



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUSSI ALPUA

BIOPOLTTOAINEEN KUIVAUS VOIMALAITOKSESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Automaatio-, kone- ja materiaalitek-  
niikan tiedekuntaneuvoston kokouk-  
sessa 5. lokakuuta 2011

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**ALPUA, JUSSI:** Biopolttoaineen kuivaus voimalaitoksessa

Diplomityö, 70 sivua, 10 liitesivua

Joulukuu 2011

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: biopolttoaine, kuivuri, herkkyysanalyysi, kannattavuus

Päästörajoitusten kiristyessä on etsittävä uusia keinoja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi uusiutuvilla biopolttoaineilla. Yksi vaihtoehto on alentaa biopolttoaineiden kosteuspitoisuutta termisellä kuivauksella, jolloin saadaan kasvatettua biopolttoaineen lämpöarvoa. Tässä työssä on tarkoituksena tehdä biopolttoaineen kuivurille teknistaloudellinen tarkastelu voimalaitosympäristössä. Tavoitteena on saada aikaan laskentamalli, jota voidaan käyttää hyväksi kuivurin mitoituksessa sekä kannattavuuden laskemisessa.

Työ tehdään neljässä osassa, joista ensimmäisessä käsitellään teorioita biopolttoaineista ja niiden laatuominaisuuksista, kostean ilman termodynamiikasta, kuivumisesta sekä ilmastopäästöistä. Toisessa osassa perehdytään kuivuriteknologioihin, jotka soveltuvat biopolttoaineiden kuivaukseen, sekä kuivureiden teoreettiseen mitoitukseen. Näiden osioiden materiaali kerätään alan kirjallisuudesta. Toisen osion kuivuriteknologioista valitaan kaksi soveltuvinta kuivuria voimalaitosympäristöön. Kuivuriteknologioille valitaan toimittajat, joille lähetetään tarjouspyynnöt. Kolmannessa osiossa tarkastellaan kuivatun biopolttoaineen vaikutusta savukaasuihin sekä kattila- ja energiantuotantoprosessiin. Viimeisessä osiossa kuivurille tehdään kannattavuustarkasteluja saatujen tarjouksien perusteella. Kannattavuustarkasteluissa lasketaan investoinnin takaisinmaksuaika, nettonykyarvo sekä tehdään herkkyysanalyysi kuivurin suunnitellulle käyttöajalle. Kahden viimeisen osion mitoituksista tehdään laskentamalli.

Työn tulokset osoittavat kuivauksen tuomat edut tekniseltä kannalta niin savukaasuissa kuin kattilaprosessissakin. Vaikutus energiantuotantoprosessiin riippuu käytettävistä lämmönlähteistä. Kannattavuustarkasteluissa toimittajien tarjouksien perusteella kuivureista ei saada kannattavia voimalaitosympäristöön. Kuivureille ei saada määritettyä takaisinmaksuaikaa ja nettonykyarvo on negatiivinen. Kannattavuus paranee, jos lämmönlähteenä voidaan käyttää omakustannehinnaltaan edullisia lämmönlähteitä. Tällöin kuivurista on mahdollista saada kannattava voimalaitosympäristöön.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**ALPUA, JUSSI:** Biofuel drying in power plant

Master of Science Thesis, 70 pages, 10 Appendix pages

December 2011

Major: Power plant and combustion technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: biofuel, dryer, sensitivity analysis, profitability

While emission limits are being tightened new ways have to be investigated for replacing fossil fuels with renewable bio fuels. One option is to decrease the humidity of bio fuels by thermal drying to increase the heating value. The purpose of this study is to conduct a techno-economic examination of a biofuel dryer in a power plant. The objective is to compose a computational model which can be used for measuring the dryer and calculating the profitability for it.

The study is carried out in four stages of which the first part concentrates on introducing the theories of biofuels and their qualities, theories for thermal dynamics of humid air and theories for drying and climate emissions. The second section focuses on different dryer technologies, which are suitable for drying biofuels, as well as for the theoretical dimensioning of dryers. Material for these two parts is collected from the literature of this field. Two of the drying technologies, presented in the second section, are chosen on the basis of being the most suitable for power plant environments. Invitations to tender will be sent to select drying technology suppliers. The third part of the study reviews the effects of dried biofuel to fuel gases as well as to boiler and production processes. In the last part of the study profitability analyses are made based on received quotations from the dryer suppliers. The analyses consist of calculations of investment payback time and net present value as well as of sensitivity analysis for the planned operating time of the dryer. The computational model will be composed from the last two parts of the study.

Results of the study show the technical benefits gained both for fuel gases and for boiler process. The effect on energy production process depends on the heat sources being used. Profitability analyses, based on the quotes from dryer suppliers, indicate that dryers will not make profit in power plant environment. Additionally the analysis calculations show that payback time cannot be determined for the dryers and the net present value is negative. Profitability increases if the heat sources used can be selected on the basis of their low cost price. In these lastly mentioned circumstances it is possible to achieve a profitable dryer for power plant.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Jyväskylän Energia Oy:n Rauhalahden voimalaitoksella kesä- ja marraskuun välisenä aikana. Haluan kiittää Jyväskylän Energia Oy:tä mielenkiintoisesta ja opintoihin liittyvästä työstä sekä henkilöitä, jotka ovat edesauttaneet työn etenemisessä. Kiitän ohjaajaani kehityspäällikkö Risto Ryyminiä ohjauksesta ja opastuksesta sekä käyttöpäällikkö Tero Saarnoa opastuksesta ja lähtötiedoista. Kiitokset myös työn tarkastajalle professori Risto Raikolle ohjauksesta työn aikana. Ennen kaikkea haluan kiittää vanhempiani sekä vaimoani Elliä, joka jaksoi uskoa tähän reilun kahden vuoden mittaiseen prosessiin.

21.11.2011

---

Jussi Alpua

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Biopolttoaineen kuivaaminen.....	2
2.1	Kuivauksen tuomat edut.....	2
2.2	Biopolttoaineet .....	3
2.2.1	Hake ja murska.....	4
2.2.2	Kuori ja kannot.....	4
2.2.3	Sahan- ja kutterinpuru .....	5
2.3	Biopolttoaineen laatuominaisuudet.....	5
2.3.1	Kosteuden määritelmä.....	6
2.3.2	Lämpöarvo .....	7
2.4	Kostean ilma termodynamiikkaa.....	7
2.5	Kuivumisen teoriaa .....	10
2.6	Päätöt .....	11
3	Kuivuriteknologiat .....	12
3.1	Rumpukuivuri .....	14
3.2	Hihnakuivuri .....	15
3.3	Kaskadikuivuri .....	15
3.4	Pneumaattinen kuivuri .....	16
3.5	Leijukerroskuivuri.....	17
3.6	Siilokuivuri.....	18
3.7	Aumakuivaus .....	18
3.8	Kuivuriteknologian valinta.....	18
4	Kuivurin mitoitus .....	20
4.1	Lähtötiedot .....	20
4.2	Massa- ja energiatase .....	25
4.2.1	Yksivaiheinen kuivuri .....	26
4.2.2	Monivaiheinen kuivaus .....	32
5	Kuivauksen vaikutus prosessiin .....	34
5.1	Savukaasut .....	34
5.2	Kuivauksen vaikutus kattilaan .....	39
5.3	Energiantuotanto .....	44
6	Taloudellinen tarkastelu .....	46
6.1	Kuivurin investointikustannukset.....	47
6.1.1	Andritzin hihnakuivuri .....	48
6.1.2	Metson hihnakuivuri .....	50
6.1.3	Vandenbroekin rumpukuivuri .....	51
6.1.4	Mitchell Dryersin rumpukuivuri .....	52
6.2	Kokonaiskustannukset .....	53
6.2.1	Andritzin hihnakuivuri .....	53
6.2.2	Metson hihnakuivuri .....	58

6.2.3	Kannattava hihnakuivuri .....	61
7	Laskentaohjelma .....	64
8	Yhteenveto .....	65
	Lähteet.....	67
	Liite 1: Eri puupolttoaineiden ominaisuuksien vertailu	
	Liite 2: Kostean ilman ( $h, \omega$ ) -piirros	
	Liite 3: Biopolttoaineiden ominaisuuksia kuukausittain vuosina 2005-2010	
	Liite 4: Massa- ja energiataseen laskenta monivaiheiselle kuivaukselle	
	Liite 5: Energiantuotantoprosessi	
	Liite 6: Tarjouspyyntö	
	Liite 7: Herkkyysanalyysi	
	Liite 8: Lämmönlähteiden vertailu	
	Liite 9: Laskentaohjelma	

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

C	rikkitrioksidin osuus rikkidioksidista
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
$H_{mt}$	taulukko-entalpia [kJ/mol]
h	ominaisentalpia [kJ/kg]
$h_{fg0}$	veden höyrystymislämpö, kun $t=0\text{ °C}$
$h_{fg25}$	veden höyrystymislämpö, kun $t=25\text{ °C}$
$h_{i0}$	sulamislämpö, kun $t=0\text{ °C}$
M	moolimassa [kg/mol]
m	massa [kg]
N	ainemäärä [mol]
n	ainemäärä [mol]
P	sähköteho [kW]
p	paine [Pa]
$p_h$	vesihöyryn osapaine [Pa]
$p_h'$	kylläisen vesihöyryn osapaine [Pa]
$q_i$	tehollinen lämpöarvo [kJ/kg]
$q_{iw}$	kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo [kJ/kg]
$q_s$	kalorimetrinen lämpöarvo [kJ/kg]
Q	lämpöteho [kW]
$R_u$	yleinen kaasuvakio [J/molK]
T	lämpötila [K]
t	lämpötila [°C]
u	kosteussuhde [%]
V	tilavuus [m <sup>3</sup> ]
w	vesipitoisuus [%]
y	mooliosuus

### Kreikkalaiset

$\eta$	hyötysuhde
$\lambda$	ilmakerroin
$\rho$	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi$	lisälämpö [kW]
$\varphi$	suhteellinen kosteus
$\omega$	ilman kosteus [kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub> ]

### Alaindeksit

a	asteisuus
ad	adiabaattinen

d	happokastepiste
j	jää
h	vesihöyry
hä	häviöt
k	kostea ilma
ka	kuiva-aine
kat	kattila
ki	kuiva ilma
lv	lämmönvaihdin
lä	lämmönlähde
pa	polttoaine
s	sisään
sk	savukaasu
th	jäähdytysteho
tot	kokonaismäärä
u	ulos
v	vesi
wb	märkälämpötila

#### Yläindeksit

,	kylläinen
.	suure aikayksikköä kohden

#### Lyhenteet

kl	kaukolämpö
luvo	ilman esilämmitin
pa	polttoaine
sk	savukaasu
syve	syöttövesisäiliö
TMA	takaisinmaksuaika
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet



# 1 JOHDANTO

Tiukentuvien päästörajoitusten sekä kallistuvien polttoainekustannuksien johdosta on monissa energiantuotantolaitoksissa tutkittava keinoja päästöjen sekä polttoainevirtojen alentamiseksi. Päästöjä saadaan alennettua investoimalla savukaasujen puhdistuslaitteisiin sekä korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla biopolttoaineilla. Fossiilisen polttoaineen korvaaminen biopolttoaineella kasvattaa yleensä massavirtoja heikomman lämpöarvon johdosta. Eräs keino voimalaitokselle saapuvan polttoaineen lämpöarvon nostamiseksi on laskea polttoaineen kosteusprosenttia.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia biopolttoaineen kuivausta ennen polttoa sekä kuivaukseen soveltuvan kuivurin mitoitus. Työn tavoitteena on eri kuivuritekniikoiden kartoittaminen ja soveltuvuuden analysointi sekä kuivurin massa- ja energiataseen määrittäminen. Tavoitteena on selvittää kuivatun polttoaineen vaikutus kattilan hyötysuhteeseen, energiantuotantoon sekä päästöihin. Lisäksi tavoitteena on kuivurin kokonaistaloudellinen tarkastelu osana voimalaitosprosessia.

Työssä tutustutaan aluksi biopolttoaineen kuivaukseen liittyvään teoriaan kuten biopolttoaineen ominaisuuksiin, kosteuden määrittämiseen ja kosteaan ilmaan. Työssä tarkastellaan ainoastaan biopolttoaineiden kuivaukseen sopivia kuivuritekniikoita. Kuivureista on pyritty keräämään tietoa toimintaperiaatteesta, eduista ja haitoista sekä energiankulutuksesta. Kuivuri kartoituksen pohjalta lähetetään toimittajille tarjouspyynnöt. Tarjousten pohjalta kuivureille tehdään teknistaloudellinen tarkastelu.

Teknistaloudellisesta tarkastelusta tehdään laskentaohjelma. Tavoitteena on saada laskentaohjelmasta selville halutuilla lähtöarvoilla kuivurin massa- ja energiatase, kannattavuus sekä vaikutus savukaasuihin, kattilahyötysuhteeseen, adiabaattiseen palamislämpötilaan, happokastepisteeseen ja energiantuotantoprosessiin. Kuivurin kannattavuutta tutkitaan takaisinmaksuajan, nettohyötyarvon sekä herkkyysanalyysin avulla.

Kuivurin mitoitus tehdään Jyväskylän Energian tytäryhtiön Jyväskylän Energiantuotantoon kuuluvaan Rauhalahden voimalaitokseen. Laitos on vuonna 1986 valmistunut vastapainevoimalaitos. Kattila on tekniikaltaan leijukerroskattila ja se tuottaa turpeella, puupolttoaineilla ja kivihiilellä sähköä ja kaukolämpöä. Kaukolämpöteho on 140 MW, sähköteho 87 MW ja prosessihöyryn teho 40 MW. Prosessihöyryä on käytetty Kankaan paperitehtaalla, joka on ollut suljettuna vuoden 2010 alusta lähtien. Maksimipolttoainetehtävoima on 300 MW. Voimalaitoksella on käytettävissä sekä primääri- että sekundäärilämmönlähteitä. Mahdollisia lämmönlähteitä ovat välilämpöteho, lauhde, kaukolämmön meno- ja paluuvesi sekä savukaasut.

## 2 BIOPOLTTOAINEEN KUIVAAMINEN

Biopolttoaineiksi kutsutaan eloperäisiä, fotosynteesin kautta syntyneitä kasvimassoja, jotka tuotetaan polttoaineeksi. Suomessa biopolttoaineita saadaan metsistä, soista, pelloista sekä energiatuotantoon soveltuvista orgaanisista jätteistä. Orgaanisiin jätteisiin kuuluu yhdyskunta-, maatalous- ja teollisuusjätteet. (Biopolttoaineet 2010) Puuperäiset biopolttoaineet muodostavat tärkeimmän biopolttoaineiden tuotantopotentiaalin. Se voidaan jakaa puupitoisiin jäteliemiin sekä kiinteisiin puuperäisiin biopolttoaineisiin. (Holmberg et al. 2000, 24) Tässä työssä biopolttoaineella tarkoitetaan kiinteitä puupitoisia polttoaineita.

### 2.1 Kuivauksen tuomat edut

Leijukerroskattiloissa voidaan periaatteessa polttaa biopolttoaineita, joiden kosteuspitoisuus on lähes 70 paino- %. Toivottu kosteuspitoisuus on kuitenkin alle 30 paino- %. Biopolttoaineen kuivatus vaikuttaa muun muassa seuraaviin asioihin:

- kostean polttoaineen teholliseen lämpöarvoon
- kattilan hyötysuhteeseen
- adiabaattiseen palamislämpötilaan
- kattilan ja apulaitteiden mitoittamiseen
- kattilan käyttöön
- päästöihin
- polttoaineen varastointiin ja
- polttoaineen laatuvaihteluun.

Kosteudella on suuri vaikutus biopolttoaineen teholliseen lämpöarvoon, sillä se pienenee kosteuden kasvaessa. Tehollisen lämpöarvon kasvaessa saadaan sama polttoaineteho pienemmällä polttoaineen määrällä, kuin käytettäessä kosteaa polttoainetta. Korkeampi tehollinen lämpöarvo parantaa myös kattilan hyötysuhdetta ja adiabaattista palamislämpötilaa. (Holmberg et al. 2000, 36–37)

Kattilan hyötysuhde paranee, koska savukaasujen kastepistelämpötila alenee. Aleneminen johtuu vesihöyryn osapaineen pienenemisestä savukaasuissa. Alhaisemmalla kastepistelämpötilalla voidaan savukaasujen loppulämpötilaa laskea, jolloin savukaasuista saadaan enemmän lämpötehoa talteen. Hyötysuhde paranee myös, jos polttoaineteho pysyy vakiona, koska savukaasujen määrä pienenee. (Holmberg et al. 2000, 37)

Adiabaattinen palamislämpötila nousee, koska polttoaineessa on vähemmän vettä haihdutettavana. Liian alhaisessa palamislämpötilassa kaikki polttoaineen haihtuvat

aineet eivät pala täydellisesti ja kattilan teho laskee. Adiabaattisen palamislämpötilan nousuun vaikuttaa myös korkeamman tehollisen lämpöarvon syystä tarvittava vähäisempi yli-ilmamäärä. Yli-ilmamäärän pieneneminen vähentää myös savukaasujen määrää yli-ilmamäärän alenemisen verran. (Holmberg et al. 2000, 37)

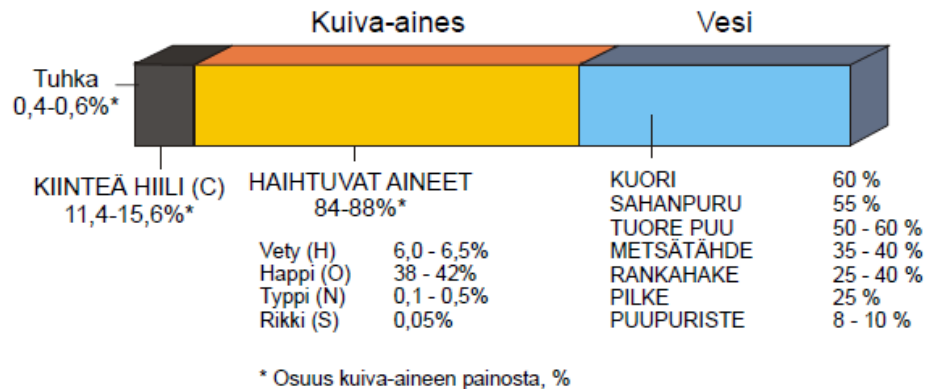
Uusissa laitoksissa, joissa on kuivuri, voidaan kattila sekä sen apulaitteet mitoittaa pienemmiksi savukaasujen tilavuusvirran alenemisen vuoksi. Vanhoissa laitoksissa pitää selvittää kuivatun polttoaineen vaikutus kattilaan sekä sen apulaitteisiin. Biopolttoaineen kuivauksella voidaan kattilassa vähentää pikeentymistä, nokipalovaaraa savukaasuhormissa sekä vesihöyryn aiheuttamaa kattilan syöpymistä. (Holmberg et al. 2000, 37–38)

Kuivauksella saadaan alennettua energiantuotannon päästöjä, koska saman lämpötehon saamiseksi tarvitaan vähemmän polttoainetta sekä korkeamman adiabaattisen palamislämpötilan johdosta palaminen on täydellisempää. Merkittävimmät päästöjen alenemiset saavutetaan, jos korkeamman tehollisen lämpöarvon ansiosta biopolttoaineella voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Hiilidioksidipäästöjen kannalta tällä on merkitystä, koska biopolttoaineiden polton ei katsota aiheuttavan hiilidioksidipäästöjä. (Holmberg et al. 2000, 38)

Kostean biopolttoaineen pitkäaikainen varastointi lämpimässä tarjoaa edullisen ympäristön mikrobitoiminnalle. Mikrobitoiminta saattaa nostaa polttoainekasan lämpötilaa useita kymmeniä asteita, joka voi johtaa itsestään syttymiseen. Lämpeneminen johtuu biokemiallisista hajotusreaktioista. Tästä syystä kostean polttoaineen varastointi aiheuttaa myös kuiva-ainetappioita. Talvisin kostea polttoaine jäätyy aiheuttaen sekä purku- että käsittelyongelmia. (Holmberg et al. 2000, 38–39)

## 2.2 Biopolttoaineet

Puun tärkeimmät rakenneaineet ovat selluloosa, hemiselluloosa sekä ligniini. Pitoisuudet vaihtelevat puulajeittain. Männyssä, kuusessa ja koivussa selluloosaa on 40–45 % ja hemiselluloosaa 25–40 % kuiva-aineen painosta. Ligniini, joka toimii puun sidosaineena ja antaa sille tarvittavan mekaanisen lujuuden, vaihtelee havupuilla 24–33 % ja lehtipuilla 16–25 %. Kuvassa 2.1. on puupolttoaineille tyypillisiä kuiva-aine- ja kosteuskoostumuksia. Tuoreen puun kosteus on yleensä 40–60 %. Kosteuteen vaikuttavat kasvupaikka, puulaji sekä ikä. Lisäksi kosteuspitoisuudet vaihtelevat puun eri osissa.



**Kuva 2.1.** Puun koostumus (Alakangas 2000, 35,39).

Polttoaineen hiili ja vety ovat palavia aineita. Mitä suurempi pitoisuus kyseisiä aineita on, sitä suurempi on polttoaineen lämpöarvo. Ligniini sisältää paljon hiiltä ja vetyä. Vastaavasti runsas hapen ja typen määrä alentaa lämpöarvoa. (Alakangas & Alanen, 2005, 27)

## 2.2.1 Hake ja murska

Hake voidaan valmistaa rangoista, hakkuutähteistä, hakkuutähdepaaleista sekä puujalostusteollisuuden puutähteistä. Hienontaminen tehdään joko terävillä terillä hakettamalla tai tylpillä, iskevillä terillä murskaamalla. Hakkeen palakoon tavoitepituus on normaalisti 30–40 millimetriä. Murskan laatu on heterogeenisempää verrattuna hakkeeseen. Se sisältää pitkähäköjä tikkuja, jotka saattavat aiheuttaa ongelmia kuljettimissa. (Puuenergia 2003, 31,37,72)

Metsähake on yleisnimitys ranka-, kokopuu- ja metsätähdehakkeelle (Alakangas, E. et al, 2005, 26). Kokopuuhake valmistetaan karsimattomista rangoista, jotka ovat joko teollisuudelle kelpaamatonta pienpuuta tai hukkarunkopuuta. Rankahake valmistetaan karsitusta runkopuusta, joka on yleensä hukkarunkopuuta. Kokopuuhaketta käytetään eniten pienimmissä lämpökeskuksissa sekä kiinteistöjen lämmityksessä. (Alakangas 2000, 59)

Metsätähteet muodostavat määrällisesti merkittävän ja käyttökelpoisen raaka-aineen polttoainetuotantoon. Se koostuu lähes kokonaan oksista. Metsätähdehakkeen kosteus vaihtelee 25–65 %. Kosteusprosenttiin vaikuttaa muun muassa vuodenaika ja varastointi. Talvisin kosteus voi nousta 65 %:iin hakkeen sekaan joutuneen lumen ja jään takia. (Alakangas 2000, 49,55)

## 2.2.2 Kuori ja kannot

Kuori on ainespuuta kuorittaessa syntyvä tähde, jonka joukossa saattaa olla puuainesta. Se muodostuu ulko- sekä sisäkuoresta eli nilasta. Kuoren osuus runkopuusta vaihtelee 10–20 % välillä. Kuoren lämpöarvo on korkea sen huomattavan ligniini määrän johdos-

ta. Lämpöarvot vaihtelevat huomattavasti siten, että lehtipuilla on pääsääntöisesti korkeammat lämpöarvot kuin havupuilla. Toisaalta korkea kosteus- ja tuhkapitoisuus heikentävät kuoren polttoaineominaisuuksia. (Alakangas 2000, 65–66)

Kannot yleensä murskataan, koska ne ovat sitkeitä hakettaa. Kosteusprosentti on yleensä noin 35 %:n luokkaa ja niiden tuhkapitoisuus voi olla suuri. Mäntykantojen tehollinen lämpöarvo on korkein, koska kannossa on suuri orgaanisen aineksen uuteainemäärä. (Alakangas 2000, 67)

### **2.2.3 Sahan- ja kutterinpuru**

Sahanpurua saadaan puutavaran sahauksen sivutuotteena. Se on yleensä kosteaa ja ilmavaa, mutta kosteus saattaa vaihdella ilmakeivasta 70 %:iin. Konehöyläyksessä syntyvää puujätettä kutsutaan kutterinlastuksi. Se on yleensä kuivaa ja kevyttä. Molempia sekä sahanpurua että kutterinpurua poltetaan yleensä seospolttoaineena. (Alakangas 2000, 69)

## **2.3 Biopolttoaineen laatuominaisuudet**

Biopolttoaineen energiakäytössä tärkeimpiä laatuominaisuuksia ovat lämpöarvo, kosteus sekä käsittelyyn vaikuttavat ominaisuudet irtotiheys ja palakoko. Tärkein laatuominaisuus on kosteus, joka vaikuttaa teholliseen lämpöarvoon eli poltossa vapautuvaan lämpöenergiaan. (Alakangas, E. et al, 2005, 26)

Biopolttoaineiden tilavuusmittana käytetään kiintokuutiometriä ( $\text{m}^3$ ). Kiintokuutiometrin määrittäminen on vaikeaa, joten se lasketaan käytännössä irtotilavuusmitoista käyttämällä muuntokerrointa ( $\text{m}^3/\text{i-m}^3$ ). Polttoaineen tiiveys on yleensä välillä 0,38–0,44. Yleisesti käytetty muuntokerroin on 0,4. (Alakangas, E. et al, 2005, 26)

FINBIO on julkaissut (nro. 5. 1998) puupolttoaineiden laatuohjeen. Ohjeen tarkoituksena on määrittää menettely, jota käyttämällä puupolttoaineiden, hakkeen, purun ja kuoren, laatu ja energiamäärä voidaan ilmoittaa ja todeta yksiselitteisesti. Taulukossa 2.1. on puupolttoainelajien laatuluokitus.

**Taulukko 2.1. Puupolttoainelajien laatutaulukko (Puupolttoaineiden laatuohje 1998).**

<b>Energiatiheys saapumistilassa MWh/i-m3 vähintään</b>			
	Hake	Puru	Kuori
E1	0,9	0,7	0,7
E2	0,8	0,6	0,6
E3	0,7	0,5	0,5
E4	0,6	0,4	0,4
<b>Kosteuspitoisuus- % enintään</b>			
K1	40	30	40
K2	50	50	50
K3	60	60	60
K4	65	65	65
<b>Partikkelikoko 95 % &lt; mm</b>			
P1	30	5	60
P2	45	10	100
P3	60	20	200
P4	100	30	Repimätön

Polttoaineen laatu määritellään valitsemalla raja-arvot saapumistilassa olevan polttoaineen energiatihedelle, kosteudelle ja partikkelikoolle. Energiatiheyteen vaikuttavat, jo aiemmin mainitut biopolttoaineen tärkeimmät laatuominaisuudet, tehollinen lämpöarvo, kosteus, irtotiheys ja palakoko. Valittaessa raja-arvoa energiatihedelle ja kosteudelle pitää ottaa huomioon eri ominaisuuksien välinen riippuvuus käyttämällä hyödyksi eri puupolttoaineiden tyypillisiä ominaisuusarvoja. Laatuohjetta hyödynnetään puupolttoainekaupassa. (Puupolttoaineiden laatuohje 1998) Liitteeseen 1 on koottu eri biopolttoaineiden ominaisuuksien vertailu, jossa on muun muassa kosteusprosentti, tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa sekä saapumistilassa (Alakangas 2000, 152).

### 2.3.1 Kosteuden määritelmä

Yleensä hakkeen kosteudella ymmärretään märkäpainosta laskettua vesipitoisuutta w

$$w = m_v / (m_{ka} + m_v) * 100 \% , \quad (2.1)$$

jossa  $m_v$  on polttoaineen vesisisältö [kg] ja  $m_{ka}$  on kuivapaino [kg]. Kosteussuhteella u tarkoitetaan hakkeen sisältämän vesimassan suhdetta kuiva-ainemassaan. Kosteussuhde saadaan yhtälöstä (2.2).

$$u = m_v / m_{ka} * 100 \% \quad (2.2)$$

Kosteussuhteen u ja kosteuden w välinen yhteys on yhtälöissä (2.3) ja (2.4). (Linna & Järvinen 1983, 2,4)

$$w = u / (100 + u) * 100 \% \quad (2.3)$$

$$u = w/(100 - w) \cdot 100 \% \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Lämpöarvo

Lämpöarvo voidaan ilmoittaa joko kalorimetrisenä lämpöarvona (ylempi lämpöarvo), jolloin palamisen tuloksena syntynyt vesi on nestefaasissa tai tehollisella lämpöarvolla (alempi lämpöarvo), jolloin palamisreaktiossa syntynyt vesi on höyryfaasissa. Kalorimetrinen lämpöarvo on siis nesteen höyrystymiseen vaadittavan energiamäärän suurempi kuin tehollinen lämpöarvo.

Polttoaineen kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo saadaan suorittamalla mittaus pommikalorimetrissä vakio-tilavuudessa ja huoneen lämpötilassa. Vastaavasti kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo saadaan vähentämällä kalorimetrisestä lämpöarvosta polttoaineen vedyn palaessa syntyvän veden faasimuutoksen vaikutus eli

$$q_i = q_s - 219,6 \cdot H \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.5)$$

jossa  $q_i$  on tehollinen lämpöarvo,  $q_s$  on kalorimetrinen lämpöarvo ja  $H$  vedyn määrä paino-%:na kuiva-aineesta. Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo  $q_{iw}$  saadaan laskettua yhtälöstä (2.6).

$$q_{iw} = q_i \cdot (100 - w)/100 - 24,43 \cdot w \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.6)$$

Kirjallisuudesta löytyy useita korrelaatiota lämpöarvojen laskemiseen, joiden tulokset saattavat poiketa huomattavasti mitatusta arvosta. Syynä tähän on polttoaineen sisältämä happi, joka voi muodostaa erilaisia yhdisteitä polttoaineen palavien komponenttien kanssa. (Raiko 2002, 52–53)

## 2.4 Kostean ilma termodynamiikkaa

Kostea ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Kuivalla ilmalla tarkoitetaan siinä olevien kaasujen – typpi, happi, hiilidioksidi ja jalokaasut – seosta ilman vesihöyryä. Ideaalikaasun tilayhtälön mukaan kuivan ilman ja vesihöyryn osatiheys  $p$  kosteassa ilmassa on

$$\rho = p \cdot M / (R_u \cdot T) \quad [\text{kg/m}^3], \quad (2.7)$$

jossa  $p$  on kuivan ilman tai vesihöyryn osapaine [Pa],  $R_u$  on yleinen kaasuvakio (8,314 J/molK) ja  $M$  kuivan ilman tai vesihöyryn molaarinen massa ( $M_{ki}=0.02896$  kg/mol ja  $M_h=0.01802$  kg/mol). Alaindekseillä  $ki$  tarkoitetaan kuivaa ilmaa ja  $h$  vesihöyryä. Kostean ilman tiheys on osatiheysien summa.

$$\rho = \rho_i + \rho_h \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.8)$$

Vastaavasti kostean ilman kokonaispaine on kostean ilman ja vesihöyryn osapaineiden summa.

$$p = p_{ki} + p_h \quad [\text{Pa}] \quad (2.9)$$

Kun merkitään tilavuudessa  $V$  olevan kuivan ilman määrää  $m_{ki}$ :lla sekä vesihöyryn määrää  $m_h$ :llä eli toisin sanoen  $\rho = m/V$ , saadaan ilman kosteus  $\omega$ .

$$\omega = m_h / m_{ki} \quad (2.10)$$

Ilman kosteudella tarkoitetaan ilmassa olevan vesihöyryn määrää suhteessa kuivan ilman määrään. Kosteus on dimensioton luku, mutta siinä käytetään yleensä apudimensiota  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ki}}$ . Käyttämällä hyödyksi kokonaispaineen yhtälöä (2.9) sekä ideaalikaasun tilayhtälöä (2.7) saadaan kosteus kirjoitettua muotoon

$$\omega = 0.622 * p_h / (p - p_h) , \quad (2.11)$$

missä vakio 0.622 on molaaristen massojen suhde ( $M_h/M_{ki}$ ). Tästä saadaan edelleen ratkaistua vesihöyryn osapaine  $p_h$ .

$$p_h = \omega / (0.622 + \omega) * p \quad [\text{Pa}] \quad (2.12)$$

Tietyssä lämpötilassa oleva ilma voi sisältää vain rajallisen määrän vesihöyryä. Mikäli ilman vesihöyrymäärä ylittää tämän rajan, tapahtuu lauhtumista. Maksimi vedensidotamäärä määräytyy lämpötilaa vastaavan kylläisen veden höyrynpaineen mukaan  $p_h'(T)$ . Kylläisen veden höyrynpaine löytyy taulukkoarvona höyrytaulukosta tai laske-malla likiarvoisesti yhtälöstä (2.13).

$$p_h'(T) = p_0 * \exp(11.78 * (T - 372.79) / (T - 43.15)) \quad [\text{Pa}] \quad (2.13)$$

Yhtälössä  $p_0$  on  $10^5$  Pa ja lämpötila  $T$  Kelvin-asteina. Kosteassa ilmassa olevan vesihöyryn osapaineen  $p_h$  suhdetta kyseisessä lämpötilassa vastaavaan kylläisen veden höyrynpaineeseen  $p_h'(T)$  kutsutaan suhteelliseksi kosteudeksi  $\varphi$ .

$$\varphi = p_h / p_h'(T) \quad (2.14)$$

Kostean ilman entalpiaa (2.15) laskettaessa kannattaa laskennat suorittaa kuivailmavirtojen avulla, koska se pysyy vakiona vesihöyrymäärän muutoksista huolimatta.

$$m_{ki} * h_k = m_{ki} * h_{ki} + m_h * h_h \quad (2.15)$$



Yhtälössä (2.15)  $h$  on entalpia [kJ/kg] ja alaindeksi  $k$  on kostea ilma. Käyttämällä hyödyksi ilmakehän kosteuden yhtälöä (2.10) saadaan

$$h_k = h_{ki} + \omega \cdot h_h \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.16)$$

Johtuen alhaisista paineista kuiva ilma ja vesihöyry voidaan olettaa ideaalikaasuiksi. Tällöin pätee, että ominaisentalpia on lämpötilan funktio. Kun otetaan kuivan ilman entalpien nolapisteeksi 0 °C:inen ilma ja vesihöyryn entalpien nolapisteeksi 0 °C:inen vesi, saadaan kostean ilman entalpia kuivailmakiloa kohden

$$h_k = c_{p,ki} \cdot t + \omega \cdot (c_{p,h} \cdot t + h_{fg0}) \quad [\text{kJ/kg}] , \quad (2.17)$$

jossa  $c_p$  on ilman sekä vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti tarkasteltavassa lämpötilassa,  $h_{fg0}$  on veden höyrystymislämpö lämpötilassa 0 °C (2501 kJ/kg) ja  $t$  on ilman lämpötila Celsius-asteina. (Lampinen 2008, 1-3)

Kostean ilman määrittämiseen voidaan käyttää joko kastepistettä tai sen niin sanottua märkälämpötilaa. Kun ympäristön lämpötilaa lasketaan riittävästi, alkaa tietyssä lämpötilassa vesihöyryn kondensoituminen nesteeksi. Tätä lämpötilaa kutsutaan kastepistelämpötilaksi. Kondensoituminen saadaan aikaan myös vakio lämpötilassa painetta lisäämällä.

Märkälämpötila on tasapainolämpötila, johon kostea kangas asettuu, kun se asetetaan ilmapirtaan. Tällöin vesihöyryn osapaine kankaan pinnassa on sama kuin kyllästymispaine (Karvinen, 20–21). Se määräytyy lämmön- ja aineensiirron mukaan. Käytännön laskuissa märkälämpötila voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella Mollier-diagrammista ilman tilaa kuvaavan vakioentalpiasuoran ja kyllästyskäyrän leikkauspisteestä. (Lampinen 2008, 19,31) Märkälämpötila voidaan laskea riittävällä tarkkuudella yhtälöstä (2.18). Yhtälön suurin tarkkuusalue on 0–40 °C.

$$t_{wb}(^{\circ}\text{C}) = -4,59 + 0,5586 \cdot h_k' - 2,622 \cdot 10^{-3} \cdot h_k'^2 + 5,2391 \cdot 10^{-6} \cdot h_k'^3 \quad (2.18)$$

Yhtälössä  $t_{wb}$  on märkälämpötila ja  $h_k'$  on kylläisen ilman entalpia. Entalpia lasketaan suhteellisen kosteuden arvolla 1. (Aittomäki, 72)

Mollier-diagrammin avulla pystytään määrittämään kostean ilman ominaisuuksia. Se laaditaan tietyille ilmanpaineille ja sen tavanomaiset arvot ovat  $p = 1.013 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg} = 1 \text{ atm}$ . (Lampinen 2008, 11) Liitteenä 2 on kostean ilman Mollier-diagrammi. Diagrammin pystyviivat osoittavat ilman vesisisältöä  $\omega$  [kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>ki</sub>] ja vaakaviivat ilman lämpötilaa  $t$  [°C]. Oikealle ylös kaareutuvat käyrät osoittavat ilman suhteellista kosteusprosenttia  $\phi$  ja vinot viivat ilman entalpiaa  $h_k$  [kJ/kg], lämpösisältöä, verrattuna 0 °C:ssa olevaa kuivaa ilmaa. Mollier-diagrammia apuna käyttäen saadaan laskettua kuivauksessa poistettava vesimäärä  $\dot{m}_v$

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{ki} \cdot (\omega_u - \omega_s) \quad [\text{kg/s}] , \quad (2.19)$$

jossa  $m_k$  kuivan ilman massavirta. Alaindeksi  $u$  tarkoittaa ulosmenevää ja  $s$  tarkoittaa sisääntulevaa. (Hämäläinen 2011, 53)

## 2.5 Kuivumisen teoriaa

Kuivaus on prosessi jonka aikana tapahtuu samanaikaisesti useita ilmiöitä. Vesi höyrystyessään alentaa aineen kosteutta ja saa aikaan aineen sisällä kosteusjakauman. Kosteusjakauma johtaa kapillaarivirtaukseen, joka tasaa kosteusjakaumaa. Kosteuden pienentyessä jäljellä oleva vesi sitoutuu lujemmin aineeseen ja tarvitsee enemmän lämpöenergiaa höyrystyäkseen. Samalla veden höyrynpaine alenee ja jotta höyrystyminen voisi jatkua, aineen lämpötilan täytyy nousta. Kuivausprosessin aikana aineen sisälle muodostuu siis kosteus- ja lämpötilajakauma. (Lampinen et al. 1998, 1)

Kun hygroskooppinen aine, kuten puu, joutuu kosketuksiin ilman kanssa se, joko sitoo (adsorboi) kosteutta tai luovuttaa sitä ilmaan, kunnes tietty tasapainotila on saavutettu. Kun puun sitoman veden vesihöyryn osapaine on suurempi kuin ympäröivän ilman, puu luovuttaa vettä vesihöyrynä ilmaan. (Kares & Linna 1983, 20) Tähän sorptiovoimakkuuteen vaikuttavat muun muassa puun selluloosan affiniteetit veden suhteen sekä sisäinen pinta tilavuusyksikköä kohti (Tapanainen 1982, 31).

Puun rakenteesta johtuen kosteuden siirtyminen tapahtuu paremmin puun syiden suunnassa kuin syitä vastaan kohtisuorassa. Puuhun sitoutunut vesi esiintyy pääasiassa vapaana vetenä soluonteloissa, fysikaalis-kemiallisesti sitoutuneena sekä soluonteloissa höyrynä. Lämpötilan alittaessa 0 °C vapaa vesi voi esiintyä jäänä. Loppu osa soluonteloista on täyttynyt ilmalla. (Hukka 1996, 14,32)

Helpoiten poistettavissa olevaa vapaata vettä on puun pinnalla, raoissa ja johtojänteiden välissä. Tällainen vapaasti sitoutunut kapillaarinen vesi on helpoiten poistettavissa kuivaamalla ja haihduttamalla. Haihduttamiseen tarvittava energia on likimain samansuuruinen kuin veden höyrystymiseen tarvittava energiamäärä. (Kares & Linna 1983, 19)

Fysikaalis-kemiallisesti sitoutunut vesi on vaikeammin poistettavaa kuin vapaa vesi. Fysikaalis-kemiallisen veden haihduttamiseen tarvittava energiamäärä on noin 1,5 -kertainen verrattuna vapaan veden haihtumisenergiaan. Korkeampi energiantarve johtuu tilavuuden muutoksesta, joka joudutaan tekemään vettä poistettaessa. Fysikaalis-kemiallisesti sitoutunutta vettä poistuu kuivatettavasta puusta 20–25 %:n kosteustasolla. (Kares & Linna 1983, 19)

Kemiallisesti sitoutunut hydraatti- ja kidevesi ovat vaikeimmin puusta poistettavaa vettä. Se ei poistu vielä lämpötilan noustessa veden kiehumispisteeseen. Normaalisissa kuivauksessa kemiallisesti sitoutuneella vedellä ei ole merkitystä. (Kares & Linna 1983, 19)

Kuivumisnopeuteen vaikuttavat sekä aineensiirto että lämmönsiirto. Tarvittava lämpöenergia kosteuden höyrystymiseen on tuotava höyrystymisvyöhykkeelle, kuivattavan aineen pinnalle tai sen sisälle. Kosteus siirtyy joko nesteinä tai höyrynä kiinteän aineen sisältä pinnalle. Pinnalta kosteus siirtyy höyrynä kaasuvirtaan. (Tapanainen 1982, 9)

## 2.6 Päästöt

Käytettäessä kuivauksessa kuivauskaasuna ilmaa biopolttoaineista vapautuu lähinnä erilaisia orgaanisia yhdisteitä. Yhdisteet muodostuvat kondensoitumattomista kaasuista sekä kondensoituvista hydro- ja lipofiilisistä yhdisteistä. Kondensoitumattomat kaasuyhdisteet koostuvat pääasiassa hiilidioksidista sekä vähäisemmässä määrin vedystä, hiilimonoksidista, metaanista ja C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>-hiilivedyistä. Kondensoituvia hydrofiilisiä yhdisteitä ovat haihtuvat hapot, alkoholit, aldehydit, furfuraalit sekä hiilihydraatit. Kondensoituvia lipofiilisiä yhdisteitä ovat muun muassa rasva-, hartsi- ja hydroksidivoihapot sekä rasva-alkoholit. (Alakangas & Holviala 2003, 126)

Kuivauksesta vapautuneisiin päästöjen määrään ja koostumukseen vaikuttaa useat tekijät, kuten kuivauslämpötila, kuivausaika ja kuivattava materiaali. Kuivauslämpötilalla on suuri vaikutus päästöjen muodostumiseen. Alle 200 °C:ssa päästöt koostuvat lähinnä lipofiilisistä yhdisteistä, jotka ovat biopolttoaineen ainesosia ja vapautuvat sellaisenaan. Polttoaineen terminen hajoaminen alkaa jo 100 °C:ssa ja yli 200 °C:ssa päästöt koostuvat enimmäkseen termisen hajoamisen tuloksena syntyneistä päästöistä, kuten karboksyylihapoista, alkoholeista ja aldehydeistä. Lämpötilan noustessa termisen hajoamisen seurauksena syntyneiden päästöjen määrä kasvaa voimakkaasti. (Holmberg et al. 2000, 83)

Lähteessä Alakangas & Holviala (2003) biopolttoaineen kuivauksen päästöt määriteltiin kokeellisesti. Kokeessa mitattiin poistokaasun ja poistokaasusta lauhdutetun veden pitoisuudet. Kuivauksessa käytettiin rankahaketta ja tuoretta metsähaketta. Koe tehtiin kiintoperireaktorissa kummallekin polttoaineelle ilman sisääntulolämpötilassa 80 °C ja 100 °C. Tulosten perusteella kaasumaisten komponenttien pitoisuudet ovat pieniä. Määrä vastaa samaa pitoisuutta, kuin metsiin jääneiden hakkuutähteiden haihtuvien pitoisuudet. Sen sijaan lauhdevesien fosforipitoisuudet ovat korkeat. Lauhdevesiä ei voi laskea vesistöihin ilman esikäsitteilyä.

Savukaasujen käyttäminen kuivauskaasuna kasvattaa päästöjä sekä hajuhaittoja. Käytettäessä savukaasuja pitää myös kiinnittää huomiota enemmän kuivauskaasujen kondensoitumisriskiin. (Holmberg et al. 2000, 40)

### 3 KUIVURITEKNOLOGIAT

Kuivaus voidaan suorittaa antamalla kosteuden reagoida jonkin aineen kanssa, imeyttämällä kosteus toiseen aineeseen, jäähdyttämällä, haihduttamalla lämmön avulla tai mekaanisesti esim. puristamalla tai sentrifugoimalla. (Tapanainen 1982, 7) Kuivuri voi olla joko jatkuvatoiminen tai eräperiaatteella toimiva (Holmberg 2011, 126). Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan termisiä kuivureita, jotka soveltuvat biopolttoaineiden kuivaamiseen.

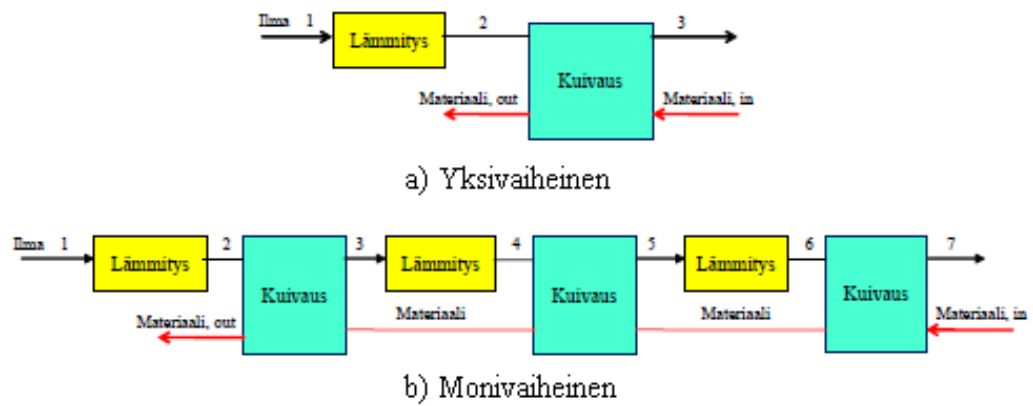
Termiset kuivurit voidaan jakaa lämmönsiirtotavan mukaan joko suoriin tai epäsuoriin kuivureihin. Suorassa kuivausmenetelmässä kuivauskaasu – ilma, savukaasu tai tulistettu höyry – on suorassa kosketuksessa kuivattavan materiaalin kanssa. Suorassa kuivauksessa lämmönsiirto tapahtuu konvektiolla.

Epäsuorassa kuivausmenetelmässä kuivauskaasun – yleensä tulistettu höyry tai kuuma vesi – ja kuivattavan materiaalin välillä on lämmönsiirtopinta. Epäsuorassa kuivauksessa lämmönsiirto tapahtuu johtumalla.

Suorat kuivurit ovat yleensä tehokkaampia, mutta ne eivät käy kaikille materiaaleille. Erityisesti hienoille ja pölyisille materiaaleille epäsuorat kuivurit ovat parempia. Käytössä voi olla lisäksi kuivureita, jotka toimivat suorien ja epäsuorien kuivureiden yhdistelmänä tai joissa lämmönsiirtona on säteily (mikroaaltokuivaus). (Holmberg 2011, 126; Roos 2008, 8)

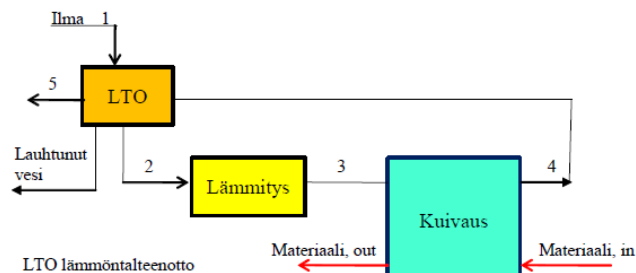
Kuivuri voidaan suunnitella toimimaan ilmakehän paineessa tai alipaineessa. Biopolttoaineen kuivaaminen tyhjiössä alentaa veden kiehumispistettä ja näin alentaa kuivaukseen tarvittavaa lämpötilaa. Tämä lisää mahdollisuuksia käyttää hukkalämpöä laitoksissa. Alipaineistettujen kuivureiden pääomakustannukset ovat tyypillisesti korkeat. Tulistetulla höyryllä toimivat kuivurit voivat toimia ylipaineessa korkeammalla lämpötilalla, jolloin lämmön talteenotossa on enemmän käyttömahdollisuuksia. (Roos 2008, 8)

Kuivausprosessin lämpö voidaan tuoda yksi- tai monivaiheisesti (kuva 3.1.). Monivaihekuivauksessa kuivaus suoritetaan useammassa eri vaiheessa. Kuivausvaiheiden välillä edellisen vaiheen poistoilma lämmitetään uudelleen. Kuivausvaiheiden lisääminen vähentää lämmön kulutusta kuivauksessa, koska aina ennen seuraavaa kuivuria ilman sisäänmenolämpötila on korkeampi kuin edellisessä vaiheessa. Monivaiheisuus myös vähentää kuivausilman tarvetta, sillä samaan ilmavirtaan saadaan jokaisen välilämmityksen ansiosta sidottua enemmän kosteutta. (Holmberg 2011, 118–119)



**Kuva 3.1.** a) Yksi- ja b) monivaiheinen kuivuriprosessi (Holmberg 2011).

Jotta yksivaiheisella kuivurilla päästään samaan ulostuloilmankosteuteen kuin monivaiheisella, joudutaan käyttämään korkeampaa kuivausilman lämpötilaa. (Holmberg 2007, 23) Energiatohokkuutta saadaan parannettua myös poistoilman lämmön talteenotolla (kuva 3.2.), kuivauskaasun osittaisella takaisinkierätyksellä tai kuivauskaasun lämpötilaa nostamalla portaittain usealla eri lämpöisellä lämmönlähteellä (Holmberg 2011).



**Kuva 3.2.** Poistoilman lämmön talteenotto (Holmberg 2011, 115).

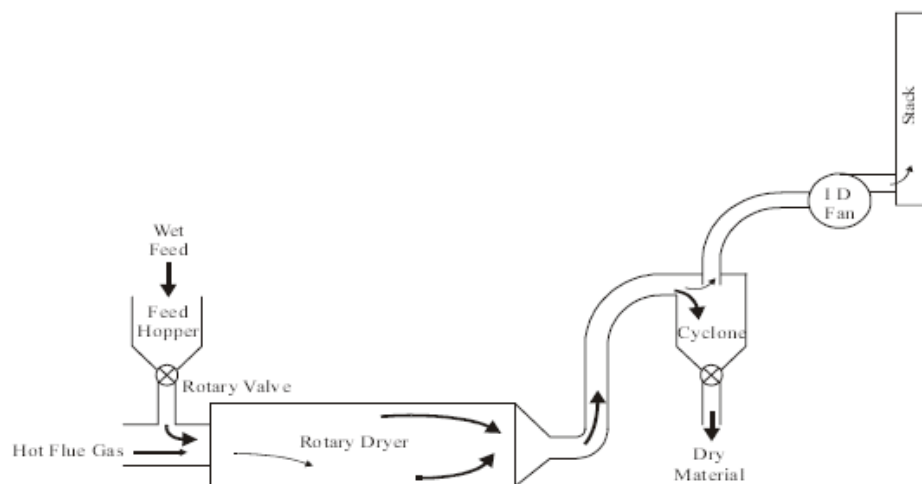
Lämmön talteenotolla on mahdollisuus esilämmittää sisäntuloilmaa poistoilmalla ja sen seurauksena pienentää kuivauksen lämmöntuontia, koska poistoilman lämpötila on yleensä korkeampi kuin sisäntuloilman. Ilman osittaisessa takaisin kierrätyksessä osa poistoilmasta sekoitetaan kuivausilman sekaan ennen lämmönvaihdinta. Kierrätyksen ansiosta kuivausilman lämpötila ennen lämmönvaihdinta kasvaa, jonka seurauksena kuivauksen lämmönkulutus pienenee. Samalla kuitenkin kuivausilman kosteus nousee ennen kuivausta, mikä kasvattaa kuivausilman massavirtaa. Tämä johtaa yleensä puhaltimien sähkönkulutuksen lisääntymiseen. Lämpötilan nostaminen portaittain usealla eri lämpöisellä lämmönlähteellä ei sinällään pienennä kuivauksen lämmönkulutusta, mutta se vähentää korkealämpötilaisten lämmönlähteiden tarvetta. (Holmberg 2011, 115–118,123)

Kuivurityyppejä on useita muun muassa kuljetin-, rumpu-, kiertomassa-, leijukerros- ja kaskadikuivureita (Holmberg 2011). Seuraavaksi käsitellään yksityiskohtaisemmin kuivureita, jotka soveltuvat biopolttoaineiden kuivaukseen.

### 3.1 Rumpukuivuri

Rumpukuivuri on yleisin käytetty kuivausmenetelmä biomassan kuivauksessa. Rumpukuivureita on useita variaatioita, joista yleisin on jatkuvatoiminen suorarumpukuivuri (kuva 3.3.). Siinä kuivattava materiaali syötetään hitaasti pyörivään rumpuun. Rummun seinämällä olevat listat nostavat materiaalin pohjalta ylös tiputtaen sen kuivauskaasuvirran läpi kuivattaen materiaalin. Kuivauskaasuna voidaan käyttää joko savukaasua tai ilmaa. Kuivauskaasu menee vasta- tai myötävirtaan kuivattavaan materiaaliin nähden.

Kuivausajat vaihtelevat partikkelikoon mukaan. Pienillä partikkeleilla kuivumiseen voi mennä alle minuutin ja isommille partikkeleille 10–30 minuuttia. (Amos 1998, 5,7) Kuivauskaasun sisääntulolämpötila voi vaihdella 200–600°C (Holmberg 2007, 10). Rummun pyörimisnopeutta ohjataan ulostulevan materiaalin kosteuspitoisuuden mittauksella. (Granö 2007, 2).



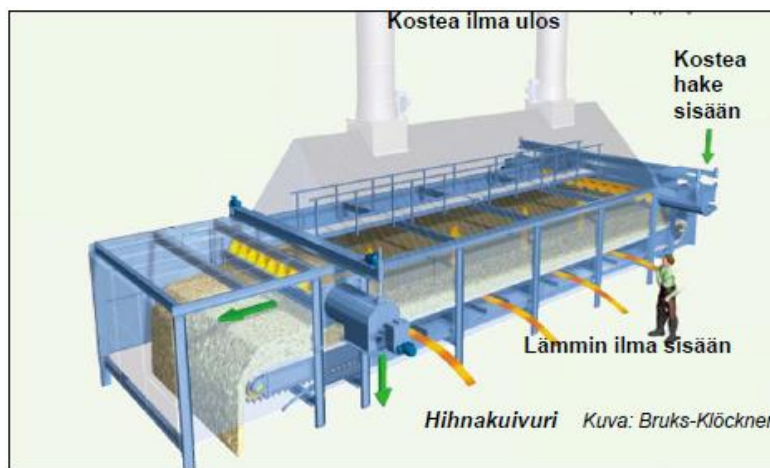
**Kuva 3.3.** Jatkuvatoiminen suorarumpukuivuri (Amos 1998, 6).

Epäsuorassa rumpukuivurissa kuivauskaasut tuodaan rummun seinämän sisälle. Kuivauskaasut eivät ole kosketuksessa kuivattavan materiaalin kanssa. Epäsuorarumpukuivuri on tehottomampi verrattuna suorakuivuriin, koska lämmönsiirto tapahtuu johdumalla. Lisäksi epäsuorarumpukuivurin käyttö- ja huoltokustannukset ovat korkeammat kuin suoran kuivurin. (Roos 2008, 10)

Rumpukuivurin etuina ovat suuri kapasiteetti, alhainen sähköteho, alhaiset käyttö- ja huoltokustannukset sekä rakenteen kestävyys. Lisäksi se sopii polttoaineille, joissa on partikkelikoon vaihteluja. Rumpukuivurin heikkouksia ovat pöly- ja hajuhaitat, suuret haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt (VOC), materiaalin kosteuden vaikea hallittavuus sekä palovaara kuivaimen jälkeen ja alasajoissa. Lisäksi karkea kuori saattaa aiheuttaa tukoksia. (Amos 1998, 17; Holmberg 2007, 10; Worley 2011, 7–8)

### 3.2 Hihnakuivuri

Hihnakuivurilla (kuva 3.4.) kuivatettava materiaali levitetään liikkuvalla hihnalle tasaiseksi kerrokseksi. Kuivauskaasut johdetaan materiaalikerroksen läpi, joko ala- tai yläpuolelta. Kuivausprosessi on jatkuvatoiminen ja se käyttää matalampia lämpötiloja kuin rumpukuivuri. Tästä syystä hihnakuivuri pystyy käyttämään voimalaitoksen sekundäärilämpöjä hyödyksi (Roos 2008, 11). Kuivauskaasun lämmittämiseen voidaan käyttää matalapainehöyryä, lämmintä ilmaa sekä vettä (Worley 2011, 10). Kuivauskaasun lämpötila voi vaihdella 30–150°C (Holmberg 2007, 10).



**Kuva 3.4.** Yksikerroshihnakuivurin periaatekuva (Granö 2007, 3)

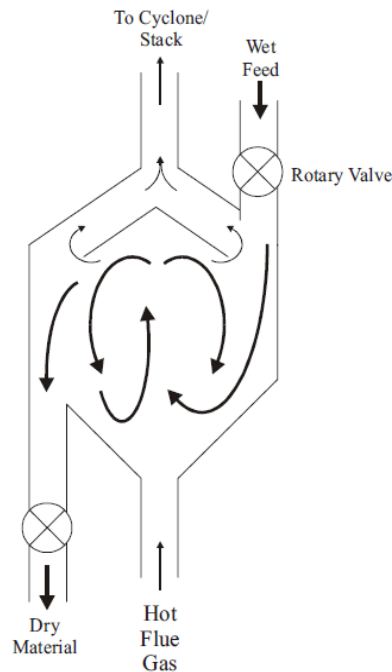
Hihnakuivuri voi olla yksi- tai monikerroksinen. Monikerroksinen kuivuri edesauttaa partikkelien sekoittumiseen, joka parantaa aineensiirto-ominaisuuksia. Aineensiirtoa voidaan parantaa myös vibraation avulla. (Holmberg 2004).

Hihnakuivurin etuina ovat sopivuus eri materiaaleille, sekundäärilämpöjen hyödyntäminen, kestävä rakenne, helppo säädettävyys sekä alhaisempi palovaarariski ja päästöt verrattuna rumpukuivuriin. Hihnakuivurin heikkouksia verrattuna rumpukuivuriin ovat suurempi investointikustannus, korkeampi käyttöteho sekä suuremmat huoltokustannukset. Lisäksi kuivuri vaatii suuren asennustilan. Asennustilaa saadaan pienennettyä käyttämällä monikerroskuivuria. (Roos 2008, 11; Worley 2011, 10–11)

### 3.3 Kaskadikuivuri

Kaskadikuivuria on yleisesti käytetty biomassan kuivaukseen Euroopassa, etenkin Ruotsissa. Sitä voidaan pitää eräänlaisena leijukerroskuivurina (katso kappale 3.5). (Roos 2008, 12) Kuvassa 3.5. on esitetty kaskadikuivurin toimintaperiaate. Kosteaa materiaalia syötetään kuivurin yläosasta. Kuivauskaasu tulee sisään osittain pohjasta ja osittain keskusputken kautta. Keskusputken kautta virrannut kaasu saa aikaan pyörreliikkeen. Kuivattava materiaali lentää virtauksen voimasta heijastinlevyä vasten, putoaa alaspäin ja nousee uudelleen ylös. Materiaali ohjautuu levyjen kohdilla matkalla ylös-

päin. Kuivauskaasu poistuu kuivurin yläosasta ja kuivunut materiaali ohjautuu poisto-reikiin säiliön reunalle. (Linna & Järvinen 1983, 34) Kuivauskaasuna voidaan käyttää savukaasua tai ilmaa. Lämpötilat vaihtelevat 160–280 °C. Tyypillinen kuivausaika on muutamia minuutteja. (Amos 1998, 9; Holmberg 2007, 10)



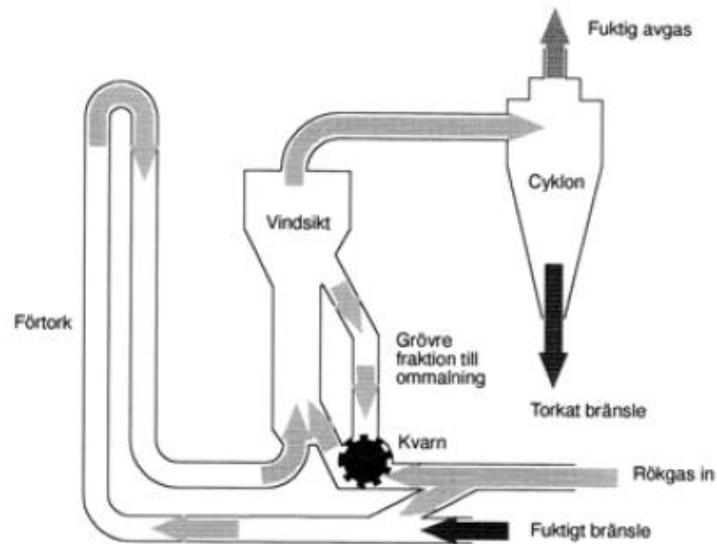
**Kuva 3.5.** Kaskadikuivurin toimintaperiaate (Amos 1998, 12).

Kaskadikuivuri vaatii pienemmän asennustilan kuin rumpukuivuri. Kuivuri sopii hyvin materiaaleille joissa on vaihteleva partikkelikoko. Heikkoutena on altistuminen korroosiolle ja eroosiolle, korkeat käyttö- ja huoltokustannukset sekä palovaara kuivurin jälkeen ja alasajoissa. Lisäksi pitkä kuori voi tarttua pyöriviin osiin ja aiheuttaa tukoksia. Kaskadikuivurin lämmön talteenotto on vaikeaa. (Holmberg 2007, 10; Roos 2008, 12; Worley 2011, 12)

### 3.4 Pneumaattinen kuivuri

Pneumaattisessa kuivurissa (kuva 3.6.) kuivattava materiaali johdetaan nopeassa virtauksessa olevaan kuivatuskaasuun. Kaasun nopeus on suurempi kuin terminaalinopeus, jolloin materiaali siirtyy suspensiona kuivauskaasun mukana. (Holmberg 2011, 144) Kuivunut materiaali erotellaan kuivauskaasusta syklonin avulla. Kuivaustekniikan ansiosta kuivuminen on hyvin nopeaa. Se kestää yleensä alle 30 sekuntia. (Amos 1998, 7) Kuivauskaasuna voidaan käyttää joko savukaasua tai höyryä. Kuivauskaasun lämpötila vaihtelee savukaasulla 150–700°C ja höyryllä, riippuen paine- ja lämpötilatasosta,  $t > 150$  °C. (Holmberg 2007, 10)





**Kuva 3.6.** *Pneumaattisen kuivurin toimintaperiaate (Holmberg 2011, 145).*

Pneumaattista kuivuria kutsutaan SSD:ksi (Superheated Steam Dryer), kun siinä käytetään kuivauskaasuna tulistettua höyryä. SSD:ssa tyypillisesti 90 % poistuvasta höyrystä kierrätetään takaisin ja loput 10 % poistetaan kondenssina tai käytetään muun prosessin osana. (Amos 1998, 9).

Pneumaattisen kuivurin etuina on pieni tilantarve verrattuna rumpukuivuriin, mutta siinä on suuremmat asennuskustannukset. Kuivurilla on yksinkertainen rakenne sekä se sopii usealle materiaalille. Käytettäessä höyryä kuivauskaasuna lämmönkulutus on vähäistä, mikäli kuivauksesta syntynyt lämpö otetaan talteen. Suspension vaatimasta suuresta kaasuvirrasta johtuen kuivurilla on suuri sähkönkulutus. Prosessilla on palovaara kuivurin jälkeen ja alasajoissa sekä korroosio ja erityisesti eroosio riski, joka kasvattaa käyttö- ja huoltokustannuksia. Kuivaustekniikasta johtuen kuivuri ei ole sopiva isoille partikkeleille. Liian suuret jakeet joudutaan tarvittaessa hakettamaan. Höyrykäyttöisessä kuivurissa on vaara vuodoille sekä ongelmia polttoaineen sisään- ja ulossyötössä. Lämmön talteenotto on vaikeaa. (Amos 1998, 17–18; Holmberg 2007, 10; Roos 2008, 12; Worley 2011, 14)

### 3.5 Leijukerroskuivuri

Leijukerroskuivurissa materiaalia leijutetaan kuivauskammiossa. Vaatimuksena on, että kuivauskaasun nopeus on suurempi kuin minimileijutusnopeus. Kuivausprosessi voidaan toteuttaa jatkuvatoimisena. Partikkeliin liikkehdinnän ansiosta kuivurissa on hyvä aineensiirto-ominaisuus. Kuivuri sopii huonosti materiaaleille, joissa partikkeleiden palakoko ja tiheys vaihtelee voimakkaasti. Tästä johtuen kuivuria ei suositella käytettäväksi biopolttoaineiden kuivaukseen. (Holmberg 2004)

### 3.6 Siilokuivuri

Siilokuivuri kuuluu kerroskuivuritekniikkaan, kuten myös kappaleen 3.5 leijukerroskuivuri. Siilokuivurissa leijutuksen sijaan kuivatettava materiaali on stationaarisena. Siilokuivuria voidaan kutsua myös fixed-bed – tekniikaksi. (Hämäläinen 2011, 2) Siilokuivurissa kuivattava materiaali syötetään siiloon yläosasta. Kuuma ilma puhalletaan materiaalikerroksen läpi joko sivusta tai vastavirtaan alapuolelta. Vastavirtaan kuivattaessa olisi hyvä käyttää sekoittimia, jottei hakekerrokseen muodostuisi kuivausilmalle virtauskanavia. Kuivattu materiaali poistuu siilon alaosasta. (Granö 2007, 4) Wahlroos (1981) on taulukoinut (3.1.) hakkeen palakoon vaikutuksesta hakekerroksen maksimipaksuuteen.

**Taulukko 3.1.** Hakekerroksen maksimipaksuus palakoon vaihdellessa (katso Norrkvist 2011, 18).

Hakkeen koko [cm]	Hakekerroksen maksimipaksuus [m]
0,5...1,0	0,8...1,0
1,0...2,0	1,0...1,5
2,0...3,0	1,5...2,0
3,0...5,0	2,0...2,5
5,0...7,0	2,5...3,0

Kappaleen 2.2.1 mukaan hakkeen tavoitepalakoko on 30–40 millimetriä. Tällöin hakekerroksen maksimipaksuus on 2,0–2,5 metriä. Sekundäärilähteessä ei oteta kantaa taulukkoarvojen mittausten menetelmiin, esimerkiksi puhallin tehoihin.

### 3.7 Aumakuivaus

Aumakuivauksessa polttoaine kasataan polttoainekentälle esimerkiksi merikonttien päälle. Merikontit muodostavat pohjalle ilmakehän, joiden kautta kuivausilma johdetaan aumaan. Kuivaukseen voidaan käyttää matalia lämpötiloja. Esimerkiksi lähteessä Halkonen (2005) käytetyssä aumakuivauksen tutkimuksessa kuivausilman lämpötila oli 50 °C. Kuivausaika tutkimuksessa oli 7 kuukautta.

Raportin perusteella kosteusvaihtelut auman eri kohdissa ovat suuria. Pohjalla kosteusprosentti on alle 5 % ja pinnalla noin 45 %. Auma vaatii ison tilan ja raportin laskujen mukaan takaisin maksuaika on 14–15 vuotta. Esimerkkiauman koko oli 140 metriä pitkä, 40 metriä leveä ja 15 metriä korkea.

### 3.8 Kuivuriteknologian valinta

Kuivurin valintaan vaikuttaa monia tekijöitä kuten kuivattavan materiaalin partikkelikoko ja ominaisuudet, pääomakustannukset, käyttö- ja huoltovaatimukset, ympäristön

päästöt, energiatehokkuus, käytettävissä olevat lämmönlähteet, tilantarve sekä palovaa-  
ra. (Roos 2008, 8) Lisäksi on otettava huomioon laitteen integroitavuus muuhun proses-  
siin (Amos 1998, 16).

Kuivurimalleja päätetään valita kaksi, matalalla lämmönlähteellä toimiva hihna-  
kuivuri sekä korkeammilla lämpötiloilla toimiva rumpukuivuri. Molemmista kuivureista  
lähetetään kaksi tarjouspyyntöä, joiden pohjalta tehdään teknistaloudellinen tarkastelu  
kappaleessa 6. Hihnakuivurin valintaa puoltavat matalien lämmönlähteiden käyttömah-  
dollisuus, päästöttömyys sekä mahdollisuus käyttää useampaa lämmönlähdettä. Toinen  
vaihtoehto olisi siilokuivuri, mutta sille tekniikalle ei ole kaupallisia toimittajia biopolt-  
toaineen kuivaukseen. Rumpukuivurin valintaa puoltavat yksinkertainen rakenne, edul-  
liset käyttökustannukset sekä sopivuus heterogeeniselle partikkelikoolle. Muissa korke-  
an lämpötilan kuivureissa haittana on heterogeenisien partikkelin sopimattomuus.

## 4 KUIVURIN MITOITUS

Tässä työssä kuivurille tehtävä mitoitus perustuu ainoastaan massa- ja energiataseisiin. Taseiden avulla selvitetään tarvittavat kuivauskaasujen ja lämmönlähteiden ainevirrat sekä lämmönvaihtimien lämpötehot. Mitoituksessa ei oteta huomioon sähkötehoa. Laskentaohjelmalla mitoitukset voi tehdä joko kesä- tai talvikaudelle. Tässä työssä kesäkausi käsittää huhtikuusta syyskuuhun ja talvikausi lokakuusta maaliskuuhun. Tämän kappaleen esimerkkeihin lämmönlähteeksi on valittu matalalämpöinen kaukolämmön paluuvesi (50 °C) ja laskentakaudeksi talvi, koska silloin polttoaineen tarve on suurimmillaan. Laskuissa on käytetty tavoitekosteutena 25 % ja mitoitusperusteena polttoaineen maksimitehoa 300 MW. Kuivattavan polttoaineen tavoitekosteus halutaan minimissään 20–25 %:iin, koska alhaisempi kosteusprosentti nostaisi todennäköisesti leijupedin lämpötiloja liian korkeaksi.

### 4.1 Lähtötiedot

Rauhalahden voimalaitokseen vastaanotetuista biopolttoaineista pidetään yllä tilastoja, johon on listattu muun muassa kostean polttoaineen massa [kg], kosteusprosentti [%] ja polttoaineteho [MWh]. Polttoaineet ovat jaoteltu teollisuuden sivutuotteisiin (hake ja murska), metsäpolttoaineisiin (hake ja murska), kantoihin ja rankapuihin. Tähän työhön teollisuuden sivutuotteiden ja metsäpolttoaineiden tiedot ovat kerätty viiden vuoden ajanjaksolta (2005–2010). Kantojen tiedot löytyvät vuodesta 2007 lähtien ja rankapuulle vuodesta 2009. Taulukossa 4.1. on eri polttoaineiden osuudet kokonaiskuiva-ainemäärästä vuosilta 2005–2010.

**Taulukko 4.1.** Polttoaineiden osuudet kokonaiskuiva-ainemäärästä vuosina 2005–2010.

Osuus kokonaismäärästä	
Teollisuuden sivutuotteet, hake	54,1 %
Teollisuuden sivutuotteet, murska	2,9 %
Metsäpolttoaineet, hake	20,4 %
Metsäpolttoaineet, murska	13,7 %
Kannot (vuodesta 2007 lähtien)	7,7 %
Rankapuu (vuodesta 2009 lähtien)	1,2 %
Yhteensä	100,0 %

Suurin osa biopolttoaineen poltosta koostuu teollisuuden sivutuotteista sekä metsäpolttoaineista. Metsäpolttoaineen murska ja kannot kattaa biopolttoaineista 21,4 %.

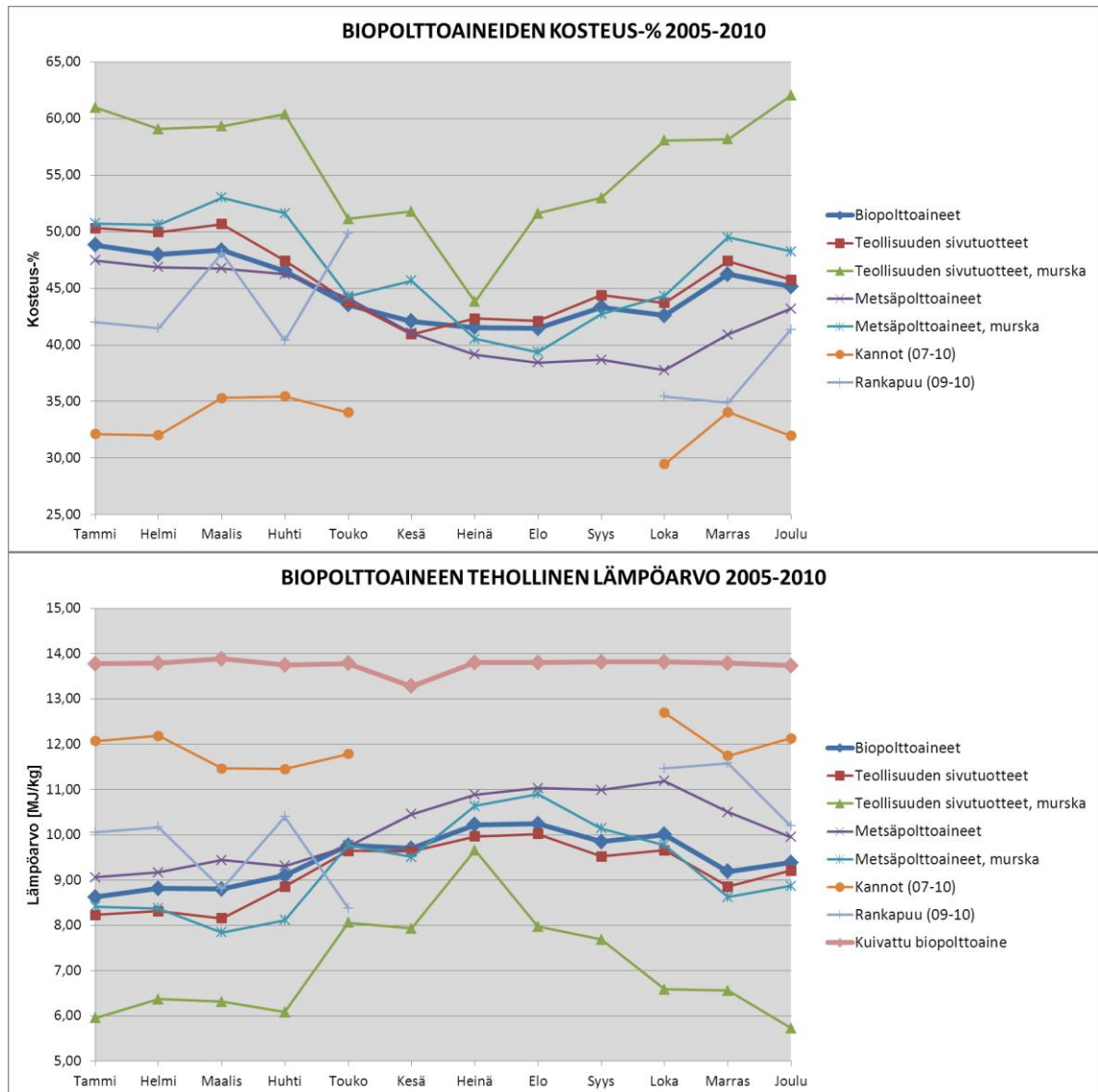
Kantojen ja rankapuiden määrässä on sekä haketta että murskaa. Rankapuun pieni osuus johtuu lyhyestä ajanjaksosta (2009–2010).

Työtä varten tehtävään laskentamalliin kerätään yhteen tiedot biopolttoaineiden massasta, kosteusprosentista ja polttoainetehosta tarkasteltavalta ajanjaksolta. Polttoaineteho MWh:sta muutetaan kJ/kg:ksi. Muutos tehdään jakamalla teho polttoaineen massalla ja kertomalla 3600 sekunnilla. Saatua arvoa on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo  $q_{iw}$  (katso kappale 2.3.2). Kostean polttoaineen tehollisesta lämpöarvosta saadaan laskettua tehollinen lämpöarvo  $q_i$  yhtälöstä (2.6). Taulukkoon on myös laskettu kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo tavoitekosteudessa, joka tässä tarkastelussa on 25 %. Taulukkoon 4.2. on laskettu kaikkien biopolttoaineiden yhteismäärä viiden vuoden jaksolta.

**Taulukko 4.2.** Kaikkien biopolttoaineiden ominaisuudet kuukausittain vuosina 2005–2010.

	Kosteusprosentti	Saapumistilassa olevan p:n tehollinen lämpöarvo	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	Kostean p:n tehollinen lämpöarvo tavoitekosteudessa 25 %
	%	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Tammi	48,82	8,63	19,19	13,78
Helmi	47,99	8,81	19,20	13,79
Maalis	48,35	8,80	19,33	13,88
Huhti	46,54	9,10	19,15	13,75
Touko	43,56	9,76	19,19	13,78
Kesä	42,08	9,70	18,52	13,28
Heinä	41,53	10,22	19,22	13,80
Elo	41,45	10,24	19,22	13,80
Syys	43,32	9,85	19,24	13,82
Loka	42,59	10,00	19,23	13,81
Marras	46,25	9,19	19,20	13,79
Joulu	45,17	9,39	19,13	13,74
<b>Keskiarvo</b>	<b>45,58</b>	<b>9,33</b>	<b>19,18</b>	<b>13,78</b>
<b>Huhti-syys</b>	<b>43,82</b>	<b>9,68</b>	<b>19,14</b>	<b>13,74</b>
<b>Loka-maalis</b>	<b>46,67</b>	<b>9,11</b>	<b>19,21</b>	<b>13,80</b>

Taulukon arvot ovat painotettuja eli mitä enemmän polttoainetta on määrällisesti, sitä enemmän sillä on painoarvoa keskiarvallisesti. Liitteessä 3 on vastaava taulukko polttoainetyypeittäin. Kuvassa 4.1. on havainnollistettu taulukon 4.2. sekä liitteen 3 kosteusprosentti sekä kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo viivakuvaajana.



**Kuva 4.1.** Biopolttoaineiden kosteusprosentti sekä kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo vuosilta 2005–2010.

Kuvassa tummansininen viiva kuvaa kaikkien biopolttoaineiden arvoja (taulukko 4.2.). Kuvasta huomataan hyvin kosteuden vaikutus lämpöarvoon. Viivakaaviot ovat lähes toistensa peilikuvia. Suurin kosteuspitoisuus ja samalla alhaisin lämpöarvo ajoittuu talvikaudelle. Teollisuuden sivutuotteen (murska) sekä rankapuun kosteusvaihtelut ovat suuria, johtuen todennäköisesti pienestä polttoainemäärästä kerätyiltä ajanjaksolta. Kantoja ja rankapuita ei ole poltettu kesä- ja syyskuun aikana lainkaan. Lämpöarvon kuvaajassa on vertailuna kuivatun biopolttoaineen lämpöarvot. Lämpöarvo kasvaa keskimäärin 4,4 kJ/kg.

Rauhalahdessa maksimikuormalla kattilan polttoaineteho on noin 300 MW, jolloin biopolttoaineen osuus tehosta on noin 30 %. Massavirran (taulukko 4.3.) määrittämiseen käytetään yhtälöä (4.1)

$$Q_{pa} = q_{iw} \cdot \dot{m}_{pa} \quad [\text{kW}] , \quad (4.1)$$

jossa  $Q_{pa}$  on polttoaineteho ja  $\dot{m}_{pa}$  on kostean polttoaineen massavirta. Polttoainetehona käytetään 30 %:a maksimitehosta eli 90 MW:a ja kostean polttoaineen tehollisena lämpöarvona käytetään taulukon 4.2. arvoja.

**Taulukko 4.3. Biopolttoaineen massavirrat sekä tehon muutokset.**

	Kuivaamaton biopolttoaine		Kuivattu biopolttoaine			
	Massavirta	Kuiva-aineen massavirta	Massavirta (90 MW)	Maksimi-massavirta	Lämpöteho	Muutos lämpötehossa
	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	MW	MW
Tammi	10,43	5,34	6,53	7,12	98,09	8,09
Helmi	10,21	5,31	6,53	7,08	97,65	7,65
Maalis	10,23	5,28	6,48	7,04	97,78	7,78
Huhti	9,89	5,29	6,55	7,05	96,94	6,94
Touko	9,22	5,20	6,53	6,94	95,57	5,57
Kesä	9,28	5,38	6,78	7,17	95,16	5,16
Heinä	8,80	5,15	6,52	6,86	94,74	4,74
Elo	8,79	5,15	6,52	6,86	94,71	4,71
Syys	9,14	5,18	6,51	6,91	95,45	5,45
Loka	9,00	5,17	6,51	6,89	95,15	5,15
Marras	9,79	5,26	6,53	7,02	96,78	6,78
Joulu	9,59	5,26	6,55	7,01	96,30	6,30
<b>Keskiarvo</b>	<b>9,65</b>	<b>5,25</b>	<b>6,53</b>	<b>7,00</b>	<b>96,47</b>	<b>6,47</b>
<b>Huhti-syys</b>	<b>9,30</b>	<b>5,22</b>	<b>6,55</b>	<b>6,96</b>	<b>95,70</b>	<b>5,70</b>
<b>Loka-maalis</b>	<b>9,88</b>	<b>5,27</b>	<b>6,52</b>	<b>7,03</b>	<b>96,98</b>	<b>6,98</b>

Massa- ja energiataseen laskemiseen tarvitaan kuivan polttoaineen massavirta, joten kokonaismassavirrasta vähennetään kosteuspitoisuus. Jos polttoaineteho pidetään kuivattulla biopolttoaineella vakiona (90 MW), niin kuiva-aineen massavirta laskee. Kostean polttoaineen massavirta vähenee keskimäärin 3,12 kg/s.

Tavoitekosteuteen kuivatun polttoaineen maksimimassavirta on laskettu lisäämällä kosteuspitoisuus (25 %) kuivaamattoman biopolttoaineen kuiva-aineenmassavirtaan. Tavoitekosteuteen kuivattaessa vettä poistuu keskimäärin 2,65 kg/s. Taulukkoon on myös laskettu paljonko kuivatus tuo lisää tehoa biopolttoaineelle. Tehon muutos  $\Delta Q_{pa}$  saadaan laskettua joko yhtälöstä (4.2) tai (4.3).

$$\Delta Q_{pa} = \dot{m}_{pa,u} \cdot q_{iw,u} - \dot{m}_{pa,s} \cdot q_{iw,s} \quad (4.2)$$

$$\Delta Q_{pa} = \dot{m}_{ka} \cdot h_{fg25} \cdot (u_s - u_u) \quad (4.3)$$

Yhtälössä (4.2) on tärkeää muistaa, että kostean polttoaineen massavirta pienenee kuivauksen seurauksena. Yhtälössä (4.3)  $h_{fg25}$  on veden höyrystymislämpö lämpötilassa 25 °C. Yhtälössä (4.3) polttoaineteho nousee sen verran, mitä tarvitaan energiaa poistettavan veden haihduttamiseen. Kuten yhtälöstä (4.3) huomataan, polttoaineen tehon muutos ei ole riippuvainen polttoaineen tehollisesta lämpöarvosta. (Holmberg 2011, 171–172) Taulukon 4.3. tehon muutokset on laskettu yhtälön (4.2) mukaan, jolloin keskiarvallisesti tehon nousu on noin 6,47 MW. Taulukossa 4.4. ovat loput lähtöarvot, joita tarvitaan massa- ja energiataseiden sekä prosessiarvojen laskemiseen.

**Taulukko 4.4. Lähtöarvoja.**

Termodynaamisia suureita		
Kostean ilman kokonaispaine	101300	Pa
Ominaislämpökapasiteetti, ilma	1,008	kJ/kgK
Ominaislämpökapasiteetti, höyry	1,850	kJ/kgK
Ominaislämpökapasiteetti, polttoaine	1,380	kJ/kgK
Ominaislämpökapasiteetti, jää	2,210	kJ/kgK
Höyrystymisentalpia 0 °C:ssa	2501	kJ/kg
Höyrystymisentalpia 25 °C:ssa	2441	kJ/kg
Sulamislämpö	– 333	kJ/kg
Kelvin (0°C)	273,15	K
Lämpötilatasot		
Ulkoilman lämpötila, kesä	13	°C
Ulkoilman suhteellinen kosteus, kesä	75	%
Ulkoilman lämpötila, talvi	–6	°C
Ulkoilman suhteellinen kosteus, talvi	85	%
Kattilahuoneen lämpötila, kesä	25	°C
Kattilahuoneen lämpötila, talvi	20	°C
Kattilahuoneen suhteellinen kosteus	60	%
Polttoaineen lämpötila, kesä	15	°C
Polttoaineen lämpötila, talvi	–4	°C
Kaukolämpö paluu	50	°C
Kaukolämpö meno, kesä	80	°C
Kaukolämpö meno, talvi	110	°C
Lauhe syöttövesisäiliöön	125	°C
Väliottohöyry	170	°C
Savukaasu	230	°C

Taulukon ominaislämpökapasiteeteille on käytetty keskiarvoja, joista ei tule isoa virhettä tutkittavilla lämpötila-alueilla. Kaikki termodynaamiset suureet ovat lähteestä (Boles & Cengel 2007). Lämmönlähteistä ulkolämpötila sekä sen suhteellinen kosteus ovat otettu kausikeskiarvona Jyväskylän alueelta (Sääasema Jyväskylä, Nenäinniemi, 2010). Kattilahuoneen lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä polttoaineen lämpötila ovat arviota. Loput lämmönlähteet on kerätty TOPI-prosessiohjelmasta maksimi sähkötehoilla.

Kuivauksessa käytettävien lämmönlähteiden massavirrat riippuvat prosessiarvoista. Lauhteen maksimimääräksi on arvioitu noin 30 kg/s. Hyvänä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että ennen ilman esilämmitintä (luvo) voidaan ohittaa maksimissaan 1/3 savukaa-



suvirroista. (Saarno 2011) Väliottohöyryn massavirta on 16,7 kg/s ja hetkellisesti se voi olla noin 20 kg/s. Kaukolämmön meno- ja paluuveden määrät riippuvat kaukolämpöpiirin kokonaismassavirrasta.

## 4.2 Massa- ja energiatase

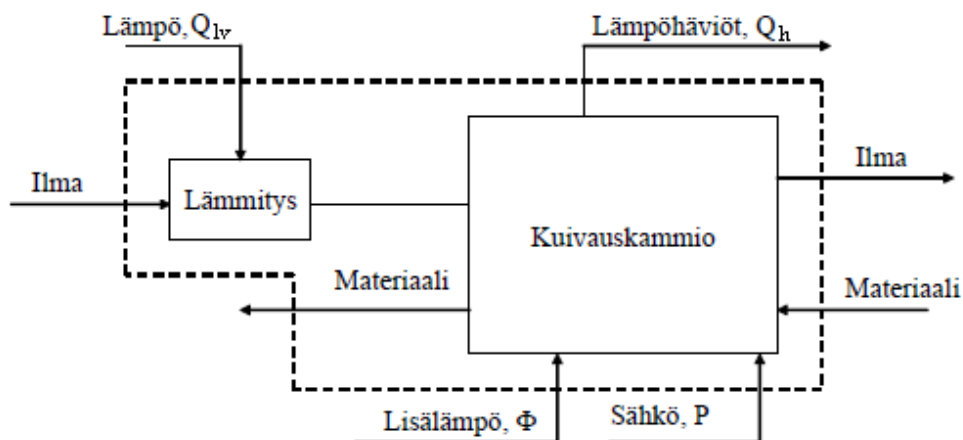
Massa- ja energiataseiden laskemiseen käytetään kappaleessa kaksi esitettyjä teorioita kosteuden määritelmästä (kappale 2.3.1) sekä kostean ilman termodynamiikasta (kappale 2.4). Esimerkkilaskennat tehdään talvikaudelle (lokakuu-maaliskuu). Kuivaukseen tarvittava kuivauskaasun massavirta saadaan massataseesta, jonka yhtälö on (4.4) (Holmberg 2011, 99).

$$\dot{m}_{ki}(\omega_s - \omega_u) + \dot{m}_{ka}(u_s - u_u) = 0 \quad [\text{kg/s}] \quad (4.4)$$

Yhtälössä  $\dot{m}_{ka}$  on biopolttoaineen kuiva-aineen massavirta. Kuivurin energiatase muodostuu ilman ja polttoaineen energiavirroista sekä tuodusta lämpö- ja sähkötehosta (puhaltimen teho) sekä lämpöhäviöstä. Energiatase saadaan laskettua yhtälöstä (4.5)

$$\dot{m}_{ki}(h_{k,s} - h_{k,u}) + \dot{m}_{ka}[c_{p,ka}(t_s - t_u) + c_{p,v}(u_s t_s - u_u t_u)] + \Phi + P - Q_{hä} = 0 \quad [\text{kW}] , \quad (4.5)$$

jossa  $\Phi$  on lisälämpö,  $P$  on sähköteho,  $Q_{hä}$  on lämpöhäviö,  $c_{p,ka}$  kuiva-aineen ominaislämpökapasiteetti ja  $c_{p,v}$  veden ominaislämpökapasiteetti. Lisälämpö on nolla, koska kyseessä on kuivuri, jossa on suora lämmöntuonti (katso kappale 3). Puhaltimien tehon määrittämiseen tarvittaisiin tiedot kuivattavan polttoainekerroksen paksuudesta, joten tämäkin jätetään huomioimatta. Prosessin lämpöhäviöt otetaan huomioon ulostulevan kuivauskaasun kosteudessa. Kuvassa 4.2. on havainnollistettu energiatase, jossa on kuivauskaasun esilämmitin sekä kuivauskammio esitetty erikseen. (Holmberg 2011, 99-100)



**Kuva 4.2.** Kuivaimen massa- ja energiatase (Holmberg 2011, 101).

Kuvassa  $Q_{lv}$  on lämmönvaihtimessa siirretty lämpöteho. Seuraavaksi on käyty läpi massa- ja energiataseen laskeminen yksityiskohtaisemmin yksi- sekä monivaihekuivaukselle.

#### 4.2.1 Yksivaiheinen kuivuri

Yksivaiheisen kuivurin periaatekuva on esitetty kappaleessa 3 kuvassa 3.1.a. Taulukossa 4.5. on listaus tarvittavista laskenta-arvoista massa- ja energiataseelle yksivaiheiselle kuivurille. Taulukkoon on laskettu erikseen ilman veden sidontamäärä sekä biopolttoaineen irtokuutiosta poistettava vesimäärä.

**Taulukko 4.5.** Massa- ja energiataseen laskenta yksivaiheiselle kuivurille.

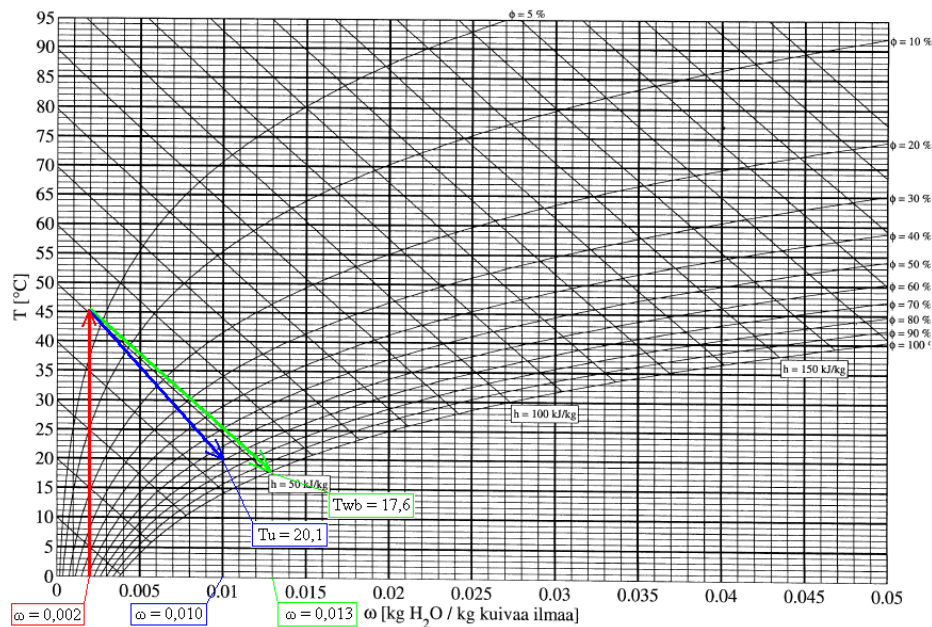
Veden sidontamäärä ilmassa			
Ilma sisään			
Ulkoilman lämpötila	t	-6,00	°C
Ulkoilman suhteellinen kosteus	$\phi$	85,00	%
Polttoaineen lämpötila	$t_{pa}$	-4	°C
Kylläisen veden höyrynpaine	$p_{h'}$	387	Pa
Vesihöyryn osapaine	$p_h$	329	Pa
Ilman kosteus	$\omega$	0,0020	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Entalpia lämmönvaihtimeen	$h_k$	-1,01	kJ/kg
Lämmitys/kuivaus			
Kaukolämpö paluu	$t_s$	50	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus ulos	$t_{a_u}$	5	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus sisään	$t_{a_s}$	26	°C
Entalpia lämmönvaihtimen jälkeen	$h_k$	50,59	kJ/kg
Entalpian muutos lämmönvaihtimessa	$\Delta h_k$	51,60	kJ/kg
Märkälämpötila	$t_{wb}$	17,6	°C
Ilman kosteus märkälämpötilassa	$\omega$	0,0130	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Ilman kosteus kuivaimen jälkeen	$\omega$	0,0099	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Irtokuutiosta poistettava vesimäärä			
Alussa			
Polttoaineen kosteus- %	$w_s$	46,67	%
Kosteussuhde	$u_s$	87,53	%
Lopussa			
Kosteusprosentti	$w_u$	25,00	%
Kosteussuhde	$u_u$	33,33	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Poistettava vesimäärä			
Veden massavirta	$m_v$	2,86	kg/s
Kosteussuhde	$\Delta u$	54,19	%

Kuivurin sisääntulevan kuivauskaasun veden höyrynpaine (387 Pa) sekä vesihöyryn osapaine (329 Pa) valitussa lämpötilassa (-6 °C) ja suhteellisessa kosteudessa (85 %) saadaan laskettua yhtälöillä (2.13) ja (2.14). Ilman kosteus (0,002 kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>ki</sub>) ja kostean ilman entalpia (-1,01 kJ/kg) lasketaan yhtälöillä (2.11) ja (2.17).

Kuivauskaasun lämmitykseen ja polttoaineen kuivaukseen käytettävä lämmönlähde (50 °C) valitaan saatavissa olevista energiavirroista, jotka on taulukoitu 4.4. lähtötietoi-

hin. Lämmönvaihtimen sisään- ja ulostuloasteisuudet ( $t_{a,u} = 5\text{ °C}$  ja  $t_{a,s} = 26\text{ °C}$ ) ovat muutettavia parametreja. Asteisuus on valittu niin, että ulostulevan lämmönlähteen lämpötila on  $20\text{ °C}$ . Entalpia lämmönvaihtimen jälkeen ( $50,59\text{ kJ/kg}$ ) lasketaan lämmönlähteen lämpötilassa vähennettynä asteisuus ( $45\text{ °C}$ ). Entalpian kasvaessa ilman kosteus pysyy vakiona.

Kuivausprosessissa kuivauskaasun lämpötila laskee ja suhteellinen kosteus kasvaa. Kuivatettavan polttoaineen lämpötila kasvaa kunnes saavutetaan tasapainotila. Tasapainotila saavutetaan märkälämpötilassa ( $17,6\text{ °C}$ ), joka saadaan laskettua yhtälöstä (2.18). Samalla kun lämpötila laskee ilman kosteus kasvaa ( $0,0130\text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ki}}$ ). Kosteus saadaan ratkaistua entalpia-yhtälöstä (2.17). Tasapainotila saavutetaan ideaalisella kuivurilla. Edellä mainittu teoria pätee sitä paremmin mitä paksumpi kuivatettavan polttoainekerroksen paksuus on (Hämäläinen 2011, 59). Kuivurissa tapahtuu kuitenkin lämpöhäviöitä, jolloin poistokaasun suhteellinen kosteus on alle  $100\%$ . Kuvassa 4.3. on havainnollistettu taulukon 4.5. arvoilla kuivaustapahtuma Mollier-diagrammiin.



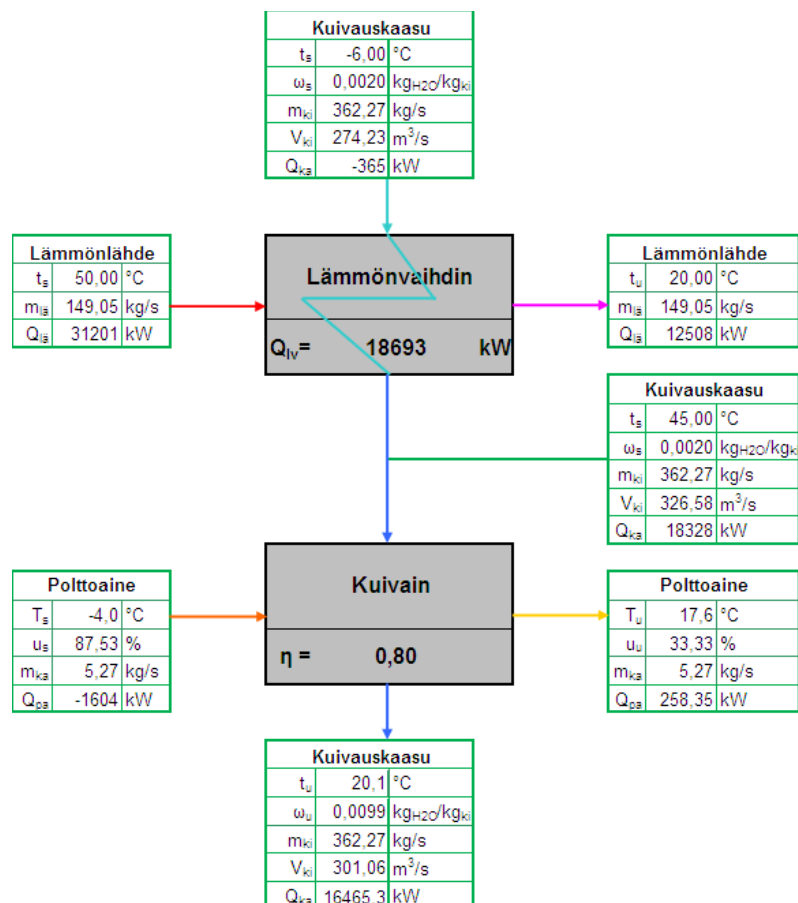
**Kuva 4.3.** Yksivaiheisen kuivuriprosessin Mollier-diagrammi.

Mollier-diagrammin periaate on käyty läpi kappaleen 2.4 lopussa. Punainen nuoli kuvaa kuivauskaasun lämmitystä, jolloin ilman kosteus pysyy vakiona ja entalpia kasvaa sekä suhteellinen kosteus pienenee. Kuvassa ei näy sisääntulevan kuivauskaasun lähtöpistettä, joka on  $-6\text{ °C}$  ja  $85\%$ . Polttoaineen teoreettista kuivumista kuvaa vihreä nuoli. Tällöin ilman kosteus kasvaa, entalpia pysyy vakiona ja kuivauskaasun lämpötila laskee. Märkälämpötila saadaan kuvaajan vakioentalpiasuoran ja kyllästyskäyrän leikkauspisteestä ( $17,6\text{ °C}$ ). Märkälämpötila on samalla kuivatun polttoaineen ulostulolämpötila.

Sininen nuoli kuvaa häviöllistä prosessia. Teoreettiseen kuivumiseen verrattuna häviöllisessä prosessissa kosteussuhde ja entalpia ovat pienempiä sekä ulostulolämpötila (20,1 °C) on korkeampi. Kuivurin hyötysuhteeksi arvioidaan 80 %. Mitä suurempi kosteussuhteiden ero on, sitä huonompi hyötysuhde kuivurilla on.

Kuivurin hyötysuhteeseen vaikuttavat lämpöhäviöt ympäristöön, materiaalin lämpiäminen sisääntulolämpötilasta vakiokuivumisvaihetta vastaavaan lämpötilaan, jäisen polttoaineen sulaminen sekä ilman kanavoituminen polttoainepedissä. Kuivuri on sitä tehokkaampi mitä lähempänä poistokaasun kosteus on märkälämpötilan kosteutta. (Holmberg 2011, 114)

Piirroksista saadaan määritettyä myös poistuvan veden massavirta (yhtälö 2.19), jossa sisään menevän kaasun kosteus on 0,002 kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>ki</sub> ja ulostulevan 0,0099 kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>ki</sub>. Irtokuutiosta poistettavan veden määrä saadaan laskettua myös polttoaineen kuiva-aineen massavirran sekä alku- ja loppukosteuden avulla. Polttoaineen kosteussuhde, jota tarvitaan kuivan ilman massavirran laskemiseen, saadaan yhtälöstä (2.4). Kuvassa 4.4. on esitetty edellä käydyn prosessin massa- ja energiatase lämmönvaihtimelle sekä kuivurille.



**Kuva 4.4.** Kuivurin massa- ja energiatase yksivaiheiselle kuivurille.

Kuivauskaasun kuivamassavirta (362,3 kg/s) saadaan laskettua yhtälöstä (4.4). Yhtälössä ovat tunnettuja biopolttoaineen kuiva-ainemassavirta, tulevan ja poistuvan polttoaineen kosteussuhde sekä kuivauskaasun kosteus ennen ja jälkeen kuivauksen. Taseeseen on laskettu myös tilavuusvirta yhtälöä (2.7) apuna käyttäen. Lämmönvaihtimen teho lasketaan energiataseesta (4.6)

$$Q_{lv} = \dot{m}_{ki} * (h_{k,u} - h_{k,s}) = \dot{m}_{la} * (c_{p,v} * (t_u - t_s)) \quad [\text{kW}] , \quad (4.6)$$

jossa  $\dot{m}_{la}$  on lämmönlähteen massavirta [kg/s]. Kuivausilmaan siirrettävä teho on kuivan ilman massavirta kerrottuna poistuvan ja tulevan ilman entalpia erotuksella. Samasta yhtälöstä saadaan ratkaistua lämmönlähteen massavirta.

Polttoaineen sisääntulo lämpötila ja massavirta määräytyvät valittavan kauden mukaan, esimerkiksi talvikaudella  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja 5,27 kg/s. Polttoaineen ulostulolämpötila on tasapainotilan mukaan märkälämpötila. Mitä korkeampi polttoaineen lämpötila on, sitä suurempi tuntuva entalpia siinä on. Tätä ei ole otettu työssä huomioon, koska sen merkitys on vähäinen. Kuivauskaasun ulostulolämpötila poikkeaa polttoaineen lämpötilasta häviöiden takia. Lopullinen lämpötila  $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  saadaan laskettua kuivurin hyötysuhteen avulla.

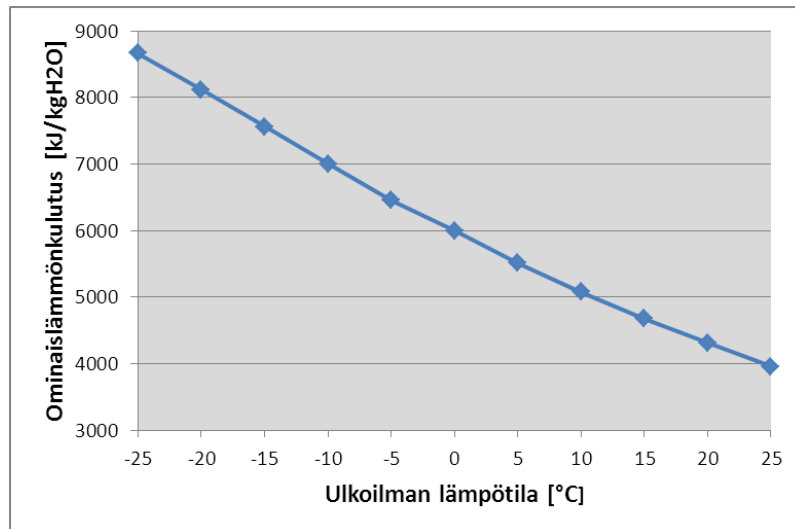
Esimerkkitilanteessa 5,27 kg/s biopolttoaineen kuivaamisessa pitää siirtää vettä polttoaineesta noin 2,86 kg/s (yhtälö 2.19). Tämän vesimäärän siirtämiseen tarvitaan  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuivauskaasua 362,3 kg/s. Kuivauskaasun lämmittäminen  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ :sta  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een tarvitsee lämpötehoa noin 18,7 MW, jolloin lämmönlähteen massavirraksi tulee 149,1 kg/s.

Jäätynyt polttoaine lisää lämpöhäviöitä huomattavasti, koska energiaa kuluu jään lauhutumiseen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen ja jään sulamiseen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa. Nämä voidaan ottaa huomioon lisäämällä energiamäärät polttoaineen entalpiaan (yhtälössä 4.5). Tällöin polttoaineen entalpiaksi saadaan

$$h_{pa} = \dot{m}_{ka} * [c_{p,ka} * t + u * t * (c_{p,v} + c_{p,j} + h_{i0})] \quad [\text{kJ/kg}] , \quad (4.7)$$

jossa  $c_{p,j}$  on jään ominaislämpökapasiteetti ja  $h_{i0}$  sulamislämpö. Kyseiset arvot löytyvät taulukosta 4.4. Jos materiaali on jäässä, kannattaa se yleensä sulattaa ennen kuivuriin tuomista. Tällöin kuivausenergiaa ei kulu sulatukseen. Sulatuksen voi suorittaa esimerkiksi matalalämpöisellä lämmönlähteellä. (Holmberg 2011, 114) Kyseinen prosessi vaatii oman laitteiston, mikä kasvattaa investointikustannuksia.

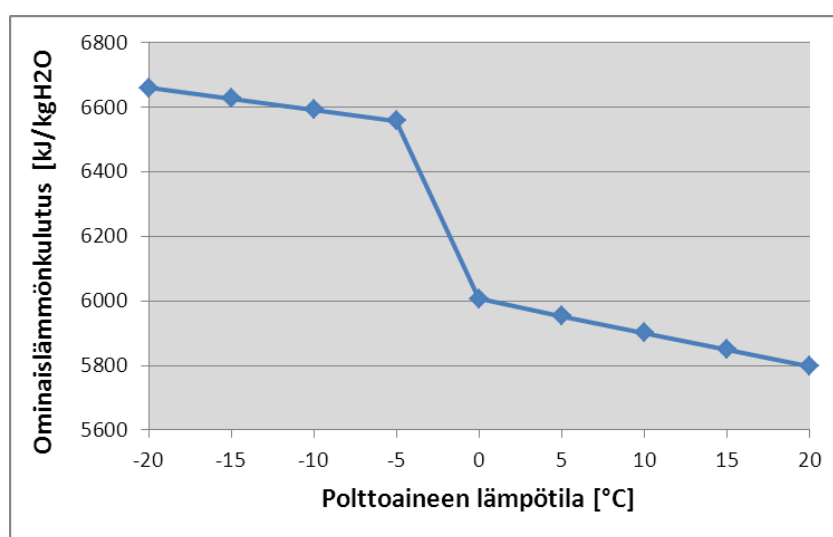
Kuivurin suorituskykyä voidaan arvioida ominaislämmönkulutuksella, joka saadaan laskettua jakamalla kuivaussysteemiin tuotu lämpö haihdutetun veden määrällä. (Holmberg 2011, 127). Esimerkkitapauksessa ominaislämmönkulutukseksi tulee noin 6544 kJ/kg<sub>H2O</sub> (18693 kW/2,86 kg<sub>H2O</sub>/s). Kuvaajassa 4.5. on tehty vertailu eri ulkoilman lämpötilojen vaikutuksesta ominaislämmönkulutukseen, kun kuivauskaasun lämpötila on  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja sisääntulevan polttoaineen lämpötila on  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vertailu on tehty  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een välillä  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een välein.



**Kuva 4.5.** Ulkoilman lämpötilan vaikutus ominaislämmönkulutukseen.

Vertaamalla esimerkiksi  $-20\text{ °C}$  ominaislämmönkulutusta ( $8120\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ )  $20\text{ °C}$ :een ( $4315\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) huomataan, että sisäntulolämpötilan ollessa  $20\text{ °C}$  tarvitaan yhden vesikilon haihduttamiseen  $3805\text{ kJ}$  vähemmän energiaa. Kuvaajasta huomaa, mitä lähemmäksi lämmönvaihtimen sisäntulolämpötila tulee ulostulolämpötilaa, sitä pienempi hyöty saavutetaan sisäntulolämpötilan nostamisella. Kyseisessä esimerkissä lämpötilan nostaminen  $20\text{ °C}$ :sta  $25\text{ °C}$ :een säästää energiaa yhtä haihdutettavaa vesikiloa kohden  $355\text{ kJ}$ .

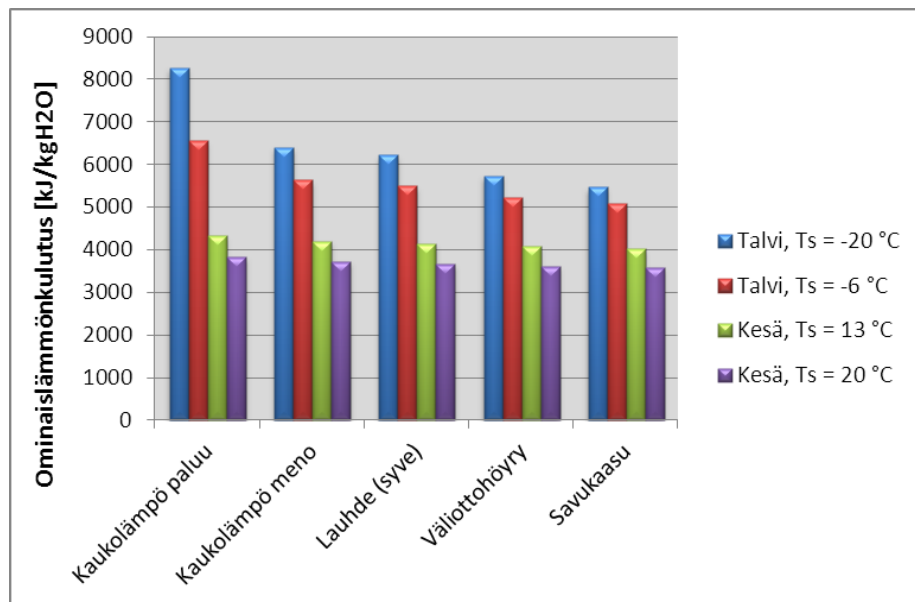
Kuvassa 4.6. on verrattu saapuvan polttoaineen lämpötilan vaikutusta ominaislämmönkulutukseen, kun muut lähtöarvot ovat taulukon 4.5. mukaiset. Vesi oletetaan olevan polttoaineessa nesteinä  $0\text{ °C}$ :ssa. Vertailu on tehty  $-20\text{ °C}$ – $20\text{ °C}$ :een välillä  $5\text{ °C}$ :een välein.



**Kuva 4.6.** Polttoaineen lämpötilan vaikutus ominaislämmönkulutukseen.

Suurin vaikutus ominaislämmönkulutukseen on, kun jää sulaa nesteeksi. Esimerkin tapauksessa ominaislämmönkulutuksen ero  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een ja  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n välillä on  $603\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Muutoin esimerkiksi lämpötilavälillä  $0\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$  eron vaikutus ominaislämmönkulutukseen on noin  $208\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Vastaava muutos kuivauskaasun lämpötilassa on  $1685\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Kuivauskaasun sekä polttoaineen tulolämpötilat ovat parametreja joihin ei pystytä vaikuttamaan. Esimerkiksi kuivauskaasun ottaminen lämpimästä kattilahuoneesta ei ole mahdollista, koska kuivurin ilmantarve on niin suuri, ettei rakennuksen korvausilman määrä riittäisi.

Kuvassa 4.7. on pylväsdiagrammi ominaislämmönkulutuksesta kesä- ja talvikausina eri kuivauskaasun sisääntulolämpötiloissa. Lähtötiedot ovat taulukon 4.4. mukaiset. Kuivauskaasun sisääntulolämpötilat ovat  $-20$ ,  $-6$  (talvikauden keskiarvo),  $13$  (kesäkauden keskiarvo) ja  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuivauskaasun sisääntulolämpötiloilla  $-20$  ja  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  polttoaineen sisääntulolämpötila on sama.



**Kuva 4.7.** Ominaislämmönkulutus kesä- ja talvikausina.

Suurimmat ominaislämmönkulutuserot eri lämpötilatasojen välillä on matalatasoisella lämmönlähteellä. Kesäkautena ominaislämmönkulutuksessa ei ole suuria eroja, riippumatta siitä millä lämmönlähteellä kuivauskaasua lämmitetään. Tällöin erot näkyvät sekä kuivauskaasun että lämmönlähteen massavirroissa. Käytettäessä väliottohöyryä talvi- ja kesäkautena ominaislämmönkulutuksen ero on  $2109\text{ kJ/kg}$ . Vastaava ero kaukolämmön paluuvvedellä oli  $4427\text{ kJ/kg}$ . Jäätynneen polttoaineen lisäenergian tarve näkyy selvästi jokaisen lämmönlähteen kohdalla. Tarkasteluja moniportaisella lämmöntuonnille ei tässä kappaleessa käsitellä, koska se ei vaikuta lämpötehoihin. Moniportaisen lämmöntuonnin edut näkyvät säästöinä käyttökustannuksissa.

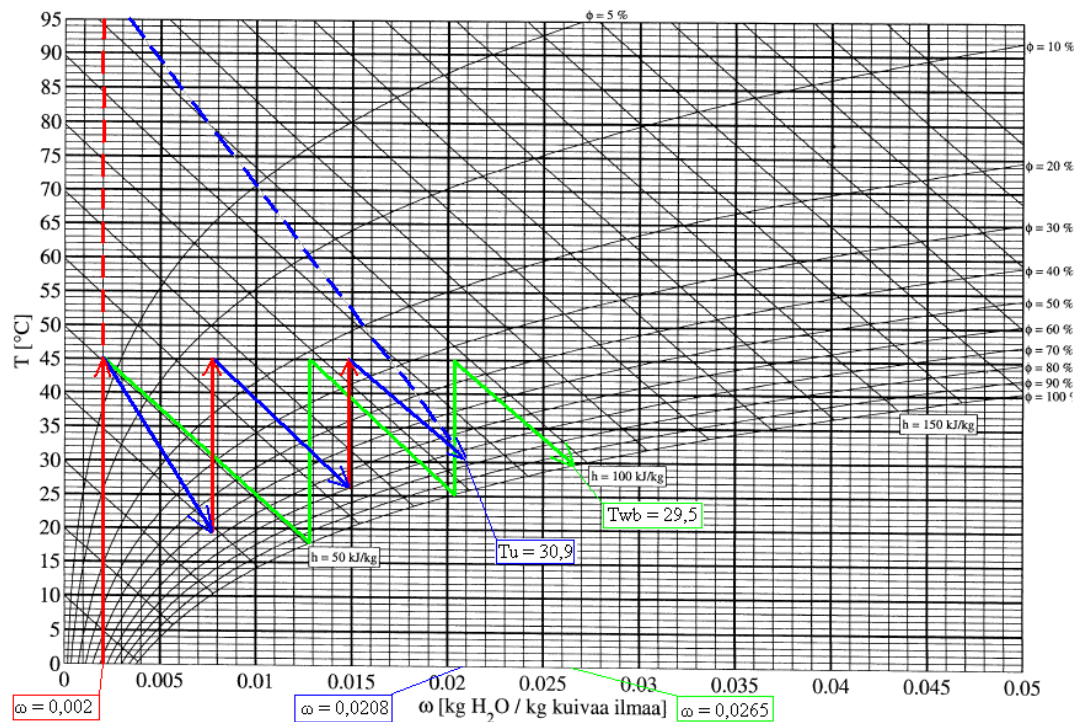


### 4.2.2 Monivaiheinen kuivaus

Teoreettisen monivaihekuivauksen periaatekuva on esitetty kappaleessa 3 kuvassa 3.1.b. Monivaihekuivauksen laskentaperiaate on sama kuin yksivaiheisella lämmöntuonnilla, sillä erotuksella, että seuraavan kuivausvaiheen kuivauskaasun sisäänmenolämpötila on edellisen vaiheen ulostulolämpötila. Liitteessä 4 on taulukoitu tarvittavat laskenta-arvot sekä kuva massa- ja energiataseesta monivaiheisessa kuivauksessa (kolmivaiheinen). Lähtöarvot ovat samat kuin yksivaiheisessa kuivauksessa. Kuivurin hyötysuhteet ovat ensimmäisessä vaiheessa 66 % ja kahdessa viimeisessä vaiheessa 80 %. Ensimmäisen vaiheen heikompi hyötysuhde johtuu jäisestä polttoaineesta.

Vertaamalla yksi- ja monivaihekuivausta huomataan, että massavirrat sekä tarvittava lämpöteho monivaihekuivauksessa ovat pienemmät verrattuna yksivaiheiseen. Lämpötehoa säästetään noin 3,7 MW ja kuivauskaasun massavirta laskee noin 218 kg/s. Monivaihekuivauksen lämmönlähteiden yhteenlaskettu massavirta laskee 12 kg/s verrattuna yksivaihekuivaukseen. Toisaalta monivaihekuivaus vaatii lämmönvaihtimia sekä puhaltimia niin monta kuin on kuivausvaiheita.

Monivaiheinen kuivausprosessi on havainnollistettu Mollier-diagrammiin kuvassa 4.8. Vertaamalla yksi- ja monivaihekuivauksen Mollier-diagrammeja huomataan monivaihekuivauksen melkein puolet suurempi ilman kosteussuhde. Tämä on suoraan verrannollinen polttoaineesta siirrettävään vesimäärään. Ilman kosteuden kasvaminen pienentää kuivauskaasun massavirran tarvetta (yhtälö 4.4).



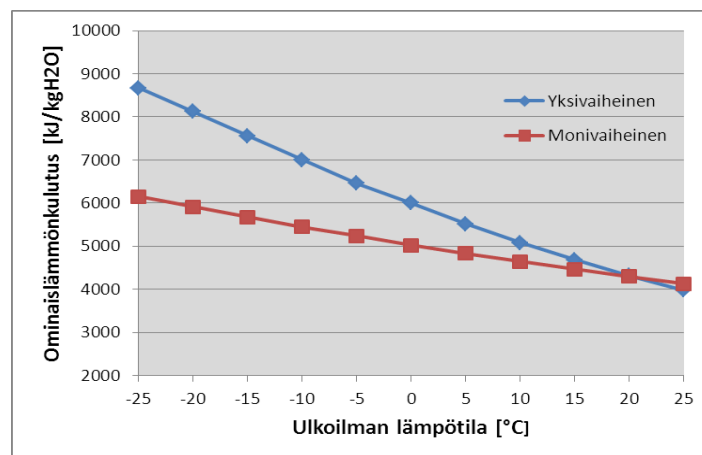
**Kuva 4.8.** Monivaiheisen kuivausprosessin Mollier-diagrammi.



Ensimmäisen kuivausvaiheen lämmöntuonti on vasemmalla oleva punainen nuoli. Kuvassa ei näy sisääntulevan kuivauskaasun lähtöpistettä, joka on  $-6\text{ °C}$  ja  $85\%$ . Häviöllinen kuivausvaihe on esitetty sinisellä nuolella ja teoreettinen kuivuminen on esitetty vihreällä nuolella. Häviöllisen kuivauksen ensimmäisessä vaiheessa näkyy hyvin poikkeama vakioentalpiasuurasta. Tämä johtuu jäisen polttoaineen sulamiseen tarvittavasta energiasta. Teoreettisessa prosessissa yksi kilo kuivaa ilmaa pystyy sisältämään  $0,0057\text{ kg}$  vettä enemmän kuin häviöllisessä prosessissa.

Kuvassa on myös esitetty katkoviivalla yksivaiheisen kuivauksen arvot, silloin kun halutaan saada aikaan sama vedenerotuskyky kuin monivaiheisessa kuivauksessa. Tässä tilanteessa lämmönlähteen pitäisi olla noin  $105\text{ °C}$  ja se kuluttaisi lämpötehoa  $0,8\text{ MW}$  enemmän kuin monivaihekuivaus. Mikäli käytössä on eritasoisia lämmönlähteitä, kuivaus kannattaa toteuttaa siten, että ensimmäiseen vaiheeseen tuodaan alhaisin lämmönlähde ja viimeiseen vaiheeseen korkein lämmönlähde.

Esimerkkitapauksessa ominaislämmönkulutukseksi tulee noin  $5275\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ . Ominaislämmönkulutus on noin  $1270\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$  pienempi kuin yksivaiheisella lämmöntuonnilla. Kuvaajassa 4.9. on tehty vertailu eri ulkoilman lämpötilojen vaikutuksesta ominaislämmönkulutukseen yksi- ja monivaiheisen kuivauksen välillä, kun kuivauskaasun lämpötila on  $45\text{ °C}$ .



**Kuva 4.9.** Yksi- ja monivaihekuivauksen ominaislämmönkulutuksien vertailu.

Otetaan vertailulämpötiloiksi  $-20\text{ °C}$  ja  $20\text{ °C}$ . Eroa ominaiskulutuksessa  $-20\text{ °C}$  on  $2210\text{ kJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$ , joka on lämpötehoina esimerkin vedenpoisto määrällä  $6,31\text{ MW}$ . Erot tasoittuvat lämpötilan noustessa ja  $20\text{ °C}$  ominaiskulutuksissa ei ole eroja. Ulkolämpötilan edelleen noustessa yksivaihekuivauksen ominaislämmönkulutus näyttäisi menevän pienemmäksi verrattuna monivaihekuivaukseen.

Teknilliseltä kannalta katsottuna monivaihekuivaus on tehokkaampi ominaiskulutuksen suhteen varsinkin talviaikaan. Lämmöntuontitavasta riippumatta, mitä korkeampi sisääntulolämpötila kuivauskaasulla on, sitä enemmän säästetään lämpötehoa. Monivaihekuivaus on rakenteeltaan monimutkaisempi ja vaatii todennäköisesti enemmän huoltotoimenpiteitä.

## 5 KUIVAUKSEN VAIKUTUS PROSESSIIN

Kappaleessa 5 on tarkoitus tarkastella kuivatun polttoaineen vaikutusta savukaasuihin, kattilaan sekä energiantuotantoon. Kuten kappaleessa 2.1 on mainittu, biopolttoaineen kuivaus vaikuttaa prosessin eri osiin, kuten ilmakertoimeen, kattilan hyötysuhteeseen, adiabaattiseen palamislämpötilaan sekä happokastepisteeseen. Tarkastelut tehdään teknilliseltä kannalta ja savukaasulaskuille lähtöarvot ovat samat kuten kappaleen 4 massa- ja energiataselaskuissa. Kattila- ja energiaprosessin lähtöarvoina käytetään TOPI-prosessiohjelmasta saatuja arvoja. Vertailussa otetaan huomioon kuivauksesta tuleva biopolttoaineen tehon nousu.

### 5.1 Savukaasut

Tässä työssä tehdään vertailu savukaasuille ennen ja jälkeen biopolttoaineen kuivauksen. Tarvittavat kuiva-aineen koostumukset saadaan Enas Oy:n analyysitodistuksista. Savukaasutarkastelu tehdään seospolttoaineille, joten tämä on otettava huomioon polttoaineen koostumuksessa. Kuivaamattomalla polttoaineella seospolttoaine koostuu noin 68 %:a turpeesta ja noin 32 %:a biopolttoaineesta. Kuivatulla polttoaineella suhteet menevät edellä mainitussa järjestyksessä 67 % ja 33 %. Seossuhteet on laskettu taulukoiden 4.3. ja 5.2. kuiva-ainemassavirtojen mukaan.

Turpeelle kuiva-aineen keskimääräisen koostumuksen määrittämistä varten käytetään yhteensä 28 kappaletta Enas Oy:n analyysitodistuksia vuosilta 2010–2011. Biopolttoaineille todistuksia löytyy yhteensä kuusi kappaletta vuodelta 2010. Biopolttoaineiden analyysitodistukset on tehty kolmesta teollisuuden sivutuotehakkeesta, kahdesta metsäpolttoainehakkeesta ja yhdestä metsäpolttoainemurskasta. Taulukossa 5.1. on turpeen ja biopolttoaineen kuiva-aineen keskimääräiset koostumukset Enas Oy:n analyysitodistusten pohjalta.

**Taulukko 5.1.** Turpeen ja biopolttoaineiden keskimääräiset kuiva-ainekoostumukset.

Turve paino- %						
	C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Tuhka
Keskiarvo	53,57	5,76	0,18	32,51	1,62	6,35
Keskihajonta	0,86	0,15	0,06	1,65	0,21	1,87
Biopolttoaine paino- %						
Keskiarvo	50,33	6,15	0,02	41,01	0,31	2,18
Keskihajonta	0,48	0,15	0,01	2,18	0,14	1,83

Savukaasuanalyysissä otetaan huomioon polttoaineen hiili-, vety-, rikki-, happi-, typpi- ja tuhkapitoisuudet. Taulukkoon 5.1. on myös laskettu keskihajonta, jonka perusteella eniten vaihtelua lasketusta keskiarvosta esiintyy hapella ja tuhalla.

Turpeen ja biopolttoaineen massavirtaosuudet määräytyvät samoilla prosenttiosuuk-silla kuin kuiva-ainekoostumukset. Alla olevaan taulukkoon 5.2. on laskettu turpeen kosteusprosentti, kostean turpeen tehollinen lämpöarvo sekä massavirrat kuivaamatto-man ja kuivatun biopolttoaineen kanssa vuosilta 2005–2010.

**Taulukko 5.2.** *Kosteusprosentti, kostean turpeen tehollinen lämpöarvo sekä massavirrat vuosina 2005–2010.*

	Koste- uspro- sentti	Saapumistilas- sa olevan tur- peen tehollinen lämpöarvo	Turpeen massa- virta kuivaamat- toman biopoltto- aineen kanssa	Turpeen mas- savirta kuiva- tun biopoltto- aineen kanssa
	%	MJ/kg	kg/s	kg/s
Tammi	44,61	10,55	19,90	19,13
Helmi	45,02	10,52	19,96	19,24
Maalis	45,27	10,35	20,29	19,54
Huhti	44,94	10,38	20,23	19,56
Touko	45,15	10,34	20,32	19,78
Kesä	43,85	10,57	19,87	19,38
Heinä	45,03	10,18	20,62	20,15
Elo	44,99	10,26	20,47	20,01
Syys	45,65	10,16	20,67	20,14
Loka	45,58	10,15	20,68	20,18
Marras	45,87	10,22	20,54	19,88
Joulu	44,32	10,59	19,83	19,23
<b>Keskiarvo</b>	<b>45,09</b>	<b>10,38</b>	<b>20,24</b>	<b>19,61</b>
<b>Huhti-syys</b>	<b>45,10</b>	<b>10,31</b>	<b>20,38</b>	<b>19,82</b>
<b>Loka-maalis</b>	<b>45,09</b>	<b>10,41</b>	<b>20,18</b>	<b>19,51</b>

Kostean turpeen tehollinen lämpöarvo on laskettu samalla periaatteella kuin biopolt-toaineellakin. Turpeen massavirta kuivaamattoman biopolttoaineen kanssa saadaan las-kettua yhtälöllä (4.1). Polttoainetehona käytetään turpeen osuutta maksimitehosta eli 70 %:a. Koska biopolttoaineen kuiva-ainemassavirta pysyy vakiona ja kuivauksen johdosta lämpöarvo nousee, voidaan turpeen massavirtaa vähentää kuivauksen tuoman tehon verran. Keskimäärin turvetta syötetään kattilaan 0,6 kg/s (2,16 t/h) vähemmän, kun bio-polttoaine on kuivattu 25 %:iin.

Savukaasuanalyysin mallina on käytetty lähteen Raiko (2002) periaatetta. Analyysi tehdään yhdelle kilogrammalle seospolttoainetta ja palaminen oletetaan täydelliseksi. Hiilen, vedyn ja rikin täydelliset palamisreaktiot on esitetty alla.





Polttoaineessa oleva happi ( $\text{O}_2$ ) vähentää palamisreaktiossa tarvittavaa hapen määrää. Inertit kaasut typpi ( $\text{N}_2$ ) ja vesihöyry ( $\text{H}_2\text{O}$ ) siirtyvät savukaasuihin reagoimattomina. Polttoaineen tuhka ei reagoi palamiseen. Savukaasulaskuissa ilma kannattaa jakaa happeen ja ”raakatyppeen”. Raakatyyppi sisältää inerttejä kaasuja, pääasiassa typpeä ja pienen osan muita kaasuja. Palamistarkasteluissa kuivassa ilmassa on happea 20,948 vol- % ja raakatyppeä 79,052 vol- % ja näiden moolisuhde on 3,7737. (Raiko 2002, 35–37) Alla on kuva 5.1. savukaasujen laskentataulukosta, johon on laskettu talvikauden kuivaamattoman polttoaineen savukaasuanalyysi.

Kuivaamattoman polttoaineen savukaasut										
		C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Tuhka			
		52,53	5,89	0,13	35,25	1,20	5,01			
Polttoaineen määrä [g]		1000			Palamisilman lämpötila [°C]			20		
Polttoaineen massavirta [kg/s]		30,07			Palamisilman suht. Kosteus [%]			60		
Polttoaineen kosteus [%]		45,43			Veden höyrinpaine [Pa]			2346		
Savukaasun happipitoisuus		0,030			Vesihöyryn osapaine [Pa]			1407		
					Vesihöyryn ja kuivan ilman moolisuhde			0,0141		
Vettä polttoaineessa [g]		454,30								
Kuiva-ainetta polttoaineessa [g]		545,70								
Lähtöaineet/kg <sub>pa</sub>					Savukaasu/kg <sub>pa</sub>					
Aine	M <sub>x</sub> g/mol	m <sub>x</sub> g	N <sub>x</sub> mol	O <sub>2</sub> -tarve mol	CO <sub>2</sub> mol	H <sub>2</sub> O mol	SO <sub>2</sub> mol	N <sub>2</sub> mol	O <sub>2</sub> mol	
C	12,011	286,643	23,865	23,865	23,865					
H <sub>2</sub>	2,016	32,134	15,939	7,970		15,939				
S	32,064	0,708	0,022	0,022			0,022			
O <sub>2</sub>	31,999	192,347	6,011	-6,011						
N <sub>2</sub>	28,103	6,529	0,232					0,232		
H <sub>2</sub> O	18,015	454,302	25,218			25,218				
Tuhka		27,337								
Yhteensä		1000,000		25,846						
Typeä ilmassa (O <sub>2</sub> -tarve*3,77*λ)				119,145	119,145					
Kuivaa ilmaa (typeä ilmassa+O <sub>2</sub> -tarve*λ)				150,748						
Kosteutta ilmassa (kuivaa ilmaa*y <sub>H2O</sub> )				2,124	2,124					
Yli-happi ((λ-1)*O <sub>2</sub> -tarve)				5,757	5,757					
Kosteaa polttoilmaa [mol/kg <sub>pa</sub> ] (kuivaa ilmaa+kosteutta ilmassa)				152,872						
Kosteaa savukaasua [mol/kg <sub>pa</sub> ] (CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+SO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> )				192,303	23,865	43,281	0,022	119,377	5,757	
Ilmakerroin		1,223								
Ilman tarve [mol/s]		4596,25								
	M <sub>x</sub> kg/mol	Mooliosuudet y <sub>x</sub>	Sk-virta mol/s	Tiheys mg/m <sup>3</sup> n	m <sub>x</sub> t/h					
CO <sub>2</sub>	0,044	0,124	717,53	243826,33	113,68					
H <sub>2</sub> O	0,018	0,225	1301,30	181009,21	84,39					
SO <sub>2</sub>	0,064	0,0001	0,66	328,29	0,15					
N <sub>2</sub>	0,028	0,621	3589,19	776329,85	361,96					
O <sub>2</sub>	0,032	0,030	173,10	42769,58	19,94					
Yhteensä	0,028	1,00	5781,78	1244263,26	580,13					

**Kuva 5.1.** Kuivaamattoman polttoaineen savukaasuanalyysi.

Kuvan ylälaidassa olevat kuiva-aineanalyysi, polttoainemäärä, -massavirta ja -kosteus on käsitelty edellä. Savukaasun happipitoisuutta tarvitaan, kun lasketaan polton ilmakerrointa. Polttoaineen täydellinen palaminen vaatii käytännössä aina teoreettista määrää enemmän polttoilmaa. Todellisen ilmamäärän ja teoreettisen, eli stökiometrisen, ilmamäärän suhdetta sanotaan ilmakertoimeksi. Ilmakerrointa merkitään  $\lambda$ :lla. (Raiko 2002, 39) Ilmakerroin saadaan laskettua yhtälöstä (5.4).

$$y_{O_2} = N_{O_2}/N_{sk} = (\lambda - 1) \cdot N_{O_2-tarve} / ((\lambda - 1) \cdot N_{O_2-tarve} + \lambda \cdot 3,77 \cdot N_{O_2-tarve} + CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2) \quad (5.4)$$

Yhtälössä  $y_{O_2}$  on savukaasujen happipitoisuus,  $N_{O_2}$  on savukaasuihin siirtyvä hapen määrä,  $N_{sk}$  savukaasujen moolimäärä ja  $N_{O_2-tarve}$  on polttoaineen stökiometriseen palamiseen kuluva hapen määrä. (Pitkänen 2010, 43) Tässä työssä happipitoisuuden määrittämiseksi käytettiin mitattuja arvoja. Happipitoisuus on maksimiteholla ajettaessa märille savukaasuille noin 3 %.

Kuvassa oikealla ylhäällä on laskettu polttoilman mukana tulevan veden määrä. Palamisilma otetaan kattilahuoneen yläosasta ja sen lämpötila ja suhteellinen kosteus on määritetty taulukossa 4.4. Veden höyrynpaine ja vesihöyryn osapaine saadaan yhtälöistä (2.13) ja (2.14). Polttoilmassa olevan vesihöyryn ja kuivan ilman moolisuhde saadaan laskettua yhtälön (5.5) avulla, jossa  $N_{H_2O}$  on vesihöyryn moolimäärä ja  $N_{ki}$  on kuivan ilman moolimäärä.

$$N_{H_2O}/N_{ki} = p_h / (p_{tot} - p_h) , \quad (5.5)$$

Savukaasuanalyysissä lähtöaineille lasketaan kuiva-ainemassat sekä moolimäärät. Hapen tarve saadaan laskettua palamisreaktioiden avulla. Esimerkiksi yksi mooli hiiltä vaatii yhden moolin happea ja vastaavasti yksi mooli vetyä tarvitsee puoli moolia happea. Kuten edellä mainittiin, polttoaineen happi vähentää hapen tarvetta.

Savukaasuihin syntyy hiilidioksidia ( $CO_2$ ), vettä ( $H_2O$ ) ja rikkidioksidia ( $SO_2$ ). Vettä muodostuu polttoaineen vedystä ja polttoaineen sisältämästä vedestä. Typpi siirtyy polttoaineesta sekä palamisilman mukana suoraan savukaasuihin inerttinä kaasuna. Savukaasuihin siirtyvän hapen määrä riippuu ilmakertoimesta.

Typen määrä ilmassa saadaan laskettua kokonaishapen tarpeesta kertomalla se ilmakertoimella sekä hapen ja raakatypen moolisuhteella (3,77). Ilman typpipitoisuus siirtyy savukaasuihin. Kuivan ilman määrä lasketaan kertomalla ilmakerroin hapentarpeella ja summaamalla se typen määrään ilmassa. Kuivan ilman määrää tarvitaan ilmassa olevan kosteuden määrittämiseen, joka saadaan laskettua yhtälöstä (5.5). Laskettu kosteus siirtyy savukaasuihin. Laskemalla yhteen kuiva ilma ja kostea ilma, saadaan kostean polttoilman määrä [ $mol/kg_{pa}$ ]. Yli-happea syntyy, kun polttoon syötetään ilmaa enemmän kuin teoreettinen määrä. Yli-hapen määrä saadaan kertomalla  $\lambda - 1$  hapentarpeella. Yli-ilma siirtyy savukaasuihin.

Kosteiden savukaasujen kokonaismäärä saadaan laskemalla yhteen kaikki savukaasukomponentit. Näin ollen kuvan 5.1. tilanteessa yksi kilo polttoainetta palaessaan täydellisesti tarvitsee 152,87 moolia kosteaa polttoilmaa ja poltossa syntyy kosteaa savukaasua 192,30 moolia. Kuvan alareunassa on laskettuna savukaasukomponenttien mooliosuudet jakamalla komponentti kokonaissavukaasun määrällä. Polttoilman ja savukaasun moolivirrat saadaan kertomalla moolimäärä polttoaineen massavirralla. Taulukkoon on myös laskettu komponenteittain päästöjen tiheys [ $\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$ ] sekä massakertymä tunnissa [ $\text{t}/\text{h}$ ].

Kuvassa 5.2. on vastaava savukaasulasku kuivatulla biopolttoaineella. Laskuissa on otettu huomioon biopolttoaineen tehonnousu ja turpeen massavirran pieneneminen, joka vaikuttaa seospolttoaineen kuiva-aineanalyysiin sekä polttoaineen massavirtaan. Seospolttoaineen kosteusprosentti on laskettu polttoaineiden kuiva-ainemassavirtojen suhteella.

Kuivatun polttoaineen savukaasut									
		C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Tuhka		
		52,50	5,89	0,13	35,31	1,19	4,98		
Polttoaineen määrä [g]		1000							
Polttoaineen massavirta [kg/s]		26,54							
Polttoaineen kosteus [%]		41,69							
Savukaasun happipitoisuus		0,030							
Vettä polttoaineessa [g]		416,94							
Kuiva-ainetta polttoaineessa [g]		583,06							
Lähtöaineet/kg <sub>pa</sub>					Savukaasu/kg <sub>pa</sub>				
Aine	M <sub>x</sub> g/mol	m <sub>x</sub> g	N <sub>x</sub> mol	O <sub>2</sub> -tarve mol	CO <sub>2</sub> mol	H <sub>2</sub> O mol	SO <sub>2</sub> mol	N <sub>2</sub> mol	O <sub>2</sub> mol
C	12,011	306,126	25,487	25,487	25,487				
H <sub>2</sub>	2,016	34,350	17,039	8,519		17,039			
S	32,064	0,749	0,023	0,023			0,023		
O <sub>2</sub>	31,999	205,882	6,434	-6,434					
N <sub>2</sub>	28,103	6,919	0,246					0,246	
H <sub>2</sub> O	18,015	416,945	23,144			23,144			
Tuhka		29,028							
Yhteensä		1000,000		27,596					
Typeä ilmassa				126,716				126,716	
Kuivaa ilmaa				160,328					
Kosteutta ilmassa				2,259		2,259			
Yli-happi				6,016					6,016
Kosteaa polttoilmaa [mol/kg <sub>pa</sub> ]				162,587					
Kosteaa savukaasua [mol/kg <sub>pa</sub> ]				200,931	25,487	42,442	0,023	126,963	6,016
Ilmakerroin		1,218							
Ilman tarve [mol/s]		4314,90							
	M <sub>x</sub> kg/mol	Mooliosuudet		Sk-virta		Tiheys		m <sub>x</sub>	
		y <sub>x</sub>	Muutos-%	mol/s	Muutos-%	mg/m <sup>3</sup> n	Muutos-%	t/h	Muutos-%
CO <sub>2</sub>	0,044	0,127	2,21	676,40	-5,73	249217,11	2,21	107,17	-5,73
H <sub>2</sub> O	0,018	0,211	-6,15	1126,37	-13,44	169877,49	-6,15	73,05	-13,44
SO <sub>2</sub>	0,064	0,0001	1,32	0,62	-6,55	332,63	1,32	0,14	-6,55
N <sub>2</sub>	0,028	0,632	1,79	3369,46	-6,12	790206,27	1,79	339,80	-6,12
O <sub>2</sub>	0,032	0,030	0,00	159,65	-7,77	42769,58	0,00	18,39	-7,77
Yhteensä	0,028	1,00	0,00	5332,51	-7,77	1252403,08	0,65	538,55	-7,17

**Kuva 5.2.** Kuivatun polttoaineen savukaasuanalyysi.

Vertaamalla kuivaamattoman ja kuivatun polttoaineen savukaasulaskuja huomataan, että pienemmän vesipitoisuuden johdosta kuivatulla polttoaineella on suurempi kuiva-ainemäärä kiloa polttoainetta kohden. Tämä näkyy suoraan savukaasukoostumuksien suurempina osuuksina.

Vaikka kuivatun polttoaineen savukaasun moolipitoisuudet ovat suurempia mitä kuivaamattomalla, on sen ilman tarve sekä syntyvien savukaasujen virta pienempi johdettua pienemmästä polttoainevirrasta. Ilmantarpeeseen vaikuttaa myös kuivatun polttoaineen suurempi happipitoisuus, joka laskee ilmakerrointa. Savukaasun happipitoisuus oletetaan samaksi kuin kuivaamattomalla polttoaineella (3 %). Tällöin ilmakerroin pienenee noin 0,5 %. Ilmantarve pienenee 280 mol/s ja savukaasujen määrä 450 mol/s. Pienemmällä savukaasuvirralla saadaan pienennettyä savukaasupuhaltimien tehontarvetta.

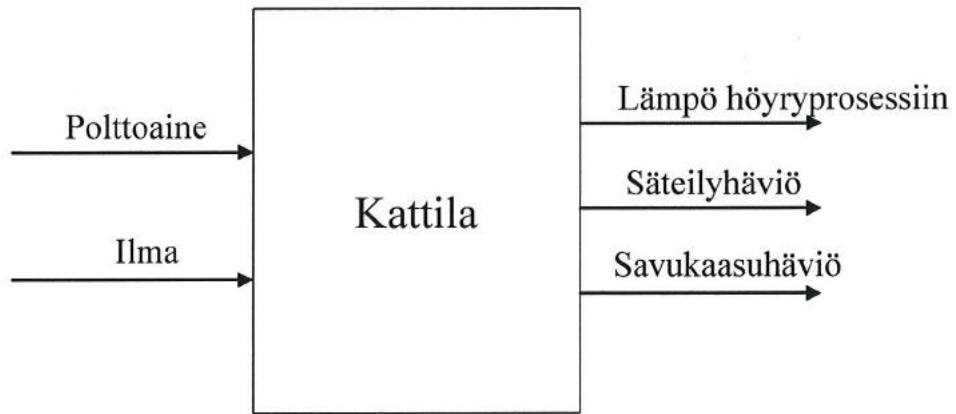
Vertaamalla kuvien 5.1. ja 5.2. moolivirtoja nähdään kuivauksen vaikutus savukaasujen päästöihin. Kuvaan 5.2. on laskettu muutos savukaasujen välillä prosentteina. Negatiivinen arvo tarkoittaa arvon vähenemistä ja positiivinen arvon kasvua. Hiilidioksidivirta vähenee 5,7 %. Rikkidioksidin määrä pienenee 6,6 %. Eniten vähenee veden osuus. Veden määrän väheneminen tulee suoraan kuivauksesta. Typen ja hapen määrän laskemiseen vaikuttaa polttoaineen massavirran sekä ilmakertoimen pieneminen. Polttoaineen kuivaus on siis yksi keino saada ilmastopäästöjä vähennettyä.

## 5.2 Kuivauksen vaikutus kattilaan

Kattilahyötysuhteen määrittämiseen käytetään Saksalaista DIN 1942 – standardin mukaista epäsuoraa menetelmää. Epäsuora menetelmä perustuu kattilan häviöiden määrittämiseen ja hyötysuhteen määrittämiseen niiden kautta. Epäsuoramenetelmä on esitetty yhtälössä (5.6).

$$\eta_{\text{kat}} = 1 - Q_{\text{hä}}/Q_s \quad (5.6)$$

Yhtälössä  $\eta_{\text{kat}}$  on kattilan hyötysuhde,  $Q_{\text{hä}}$  on kattilahäviöt sekä  $Q_s$  on kattilaan tuotu energiavirta. Kuvassa 5.3. on esitetty kattilan energiatase. Taseessa kattilaan tuodut energiavirrat sisältävät polttoainetehon sekä esilämmitetyn palamisilman. Lisäksi voi olla riippumattomia energiavirtoja, jotka koostuvat höyryluvon lämmityksestä, tulistimien ruiskutusvedestä sekä pumppujen ja puhaltimien sähkömoottoreiden käytöistä. Tässä työssä riippumattomia energiavirtoja ei ole otettu huomioon. (Huhtinen et al. 1994, 92–95)



**Kuva 5.3.** Kattilan energiatase (Holmberg 2011, 174).

Kattilasta poistuvat energiavirrat koostuvat höyryprosessiin siirrettävästä lämmöstä (jäähdytysteho), säteilyhäviöistä ja savukaasuhäviöistä. Lisäksi häviöitä tulee palamattomien häviöistä sekä tuhkan termisestä lämmöstä (Huhtinen et al. 1994, 92–95). Näitä häviöitä ei oteta työssä huomioon. Kattilan massa- ja energiatase on esitetty yhtälöissä (5.7) ja (5.8). Energiataseen avulla saadaan laskettua savukaasuhäviöt.

$$\dot{m}_{pa}*(1+u_s) + \dot{m}_k = \dot{m}_{sk} \quad (5.7)$$

$$\dot{m}_{pa}*q_{iw} + \dot{n}_k*H_{mt}(T_k) = \dot{n}_{sk}*H_{mt}(T_{sk}) + Q_{th} + Q_{hä} \quad (5.8)$$

Energiataseessa  $\dot{n}_k$  on kostean polttoilman moolivirta ja  $H_{mt}(T_k)$  on ilman taulukko-entalpia tulolämpötilassa. Taulukko-entalpiat saadaan lähteestä Karema (2002). Ulostulevissa energiavirroissa  $\dot{n}_{sk}$  on savukaasun moolivirta,  $H_{mt}(T_{sk})$  on savukaasun taulukko-entalpia,  $Q_{th}$  on jäähdytysteho ja  $Q_{hä}$  säteilyhäviöt. (Holmberg 2011, 174–175)

Polttoaineen massavirta ja kostea tehollinen lämpöarvo on esitetty kappaleessa 4.1. Ilman ja savukaasujen moolivirrat saadaan kappaleessa 5.1 lasketuista savukaasulasakuista. Jäähdytysteho saadaan lämmönsiirtoaineen vastaanottaman lämpötehon perusteella. Vastaanotettu lämpöteho on tulistetun höyryn ja korkeapaine-esilämmittimen jälkeisen syöttöveden tehojen erotus. Säteilyhäviöksi on arvioitu 2 MW. Kattilan energia- ja massataseilla saadaan yhtälöistä (5.7) ja (5.8) kattilahyötysuhteeksi yhtälö (5.9).

$$\eta_{kat} = 1 - Q_{hä}/Q_{pa} = 1 - (\dot{n}_{sk}*H_{mt}(T_{sk}) + Q_{hä})/(\dot{m}_{pa}*(q_i - u*h_{fg25})) \quad (5.9)$$

Yhtälöstä (5.9) nähdään, että kuivatulla polttoaineella polttoaineteho kasvaa, mikä parantaa kattilahyötysuhdetta. Toisaalta kattilahyötysuhde riippuu savukaasu- ja säteilyhäviöistä, jotka voivat kasvaa kuivatulla polttoaineella. (Holmberg 2011, 175)

Taulukossa 5.3. on laskettu kattilahyötysuhde kuivaamattomalla ja kuivatulla polttoaineella. Polttoainetehona käytetään TOPI-prosessiohjelmasta otettua tehoa (277 MW), jolloin sähköntuotanto on lähes maksimissaan. Tällöin saadaan myös selville vastaava



syöttöveden entalpia. Polttoainetehon lasku maksimitehosta saadaan vähentämällä turpeen massavirtaa. Biopolttoaineen osuus pysyy vakiona. Polttoilma on jaettu primääri- ja sekundääri-ilmaan. Polttoilmojen suhde edellä mainitussa järjestyksessä on 40 % ja 60 %. Primääri-ilmaan sekoitettava kiertokaasu oletetaan ominaisuuksiltaan kosteaksi ilmaksi.

Jäähdytystehon laskemiseen syöttöveden entalpia saadaan paineistetun veden taulukosta. Syöttöveden lämpötila on 231 °C ja paine noin 148 bar, jolloin entalpiaksi saadaan noin 1002 kJ/kg. Tulistetun höyryn entalpia saadaan tuorehöyryn arvoista 530 °C ja 130 bar (3402 kJ/kg). Säteilyhäviö polttoainetehosta on 0,67 %. Savukaasuhäviöt lasketaan yhtälön (5.8) avulla. Savukaasuhäviöiden ja taulukko-entalpioiden avulla saadaan laskettua iteroimalla savukaasun lämpötila ennen luvo:a.

**Taulukko 5.3. Kattilahyötysuhteiden vertaaminen.**

Kuivaamaton biopolttoaine			Kuivattu biopolttoaine		
<b>Polttoaineteho</b>	<b>277</b>	<b>MW</b>	<b>Polttoaineteho</b>	<b>277</b>	<b>MW</b>
<b>Primääripolttoilman teho</b>	<b>9,0</b>	<b>MW</b>	<b>Primääripolttoilman teho</b>	<b>8,4</b>	<b>MW</b>
Polttoilman lämpötila	205	°C	Polttoilman lämpötila	205	°C
<b>Sekundääripolttoilman teho</b>	<b>14,3</b>	<b>MW</b>	<b>Sekundääripolttoilman teho</b>	<b>13,3</b>	<b>MW</b>
Polttoilman lämpötila	215	°C	Polttoilman lämpötila	215	°C
<b>Jäähdytysteho</b>	<b>270</b>	<b>MW</b>	<b>Jäähdytysteho</b>	<b>270</b>	<b>MW</b>
<b>Säteilyhäviö</b>	<b>2</b>	<b>MW</b>	<b>Säteilyhäviö</b>	<b>2</b>	<b>MW</b>
Säteilyhäviö polttoainetehosta	0,67	%	Säteilyhäviö polttoainetehosta	0,67	%
<b>Savukaasuhäviö</b>	<b>28,3</b>	<b>MW</b>	<b>Savukaasuhäviö</b>	<b>26,8</b>	<b>MW</b>
Savukaasun lämpötila	192	°C	Savukaasun lämpötila	197	°C
<b>Kattilahyötysuhde</b>	<b>0,891</b>		<b>Kattilahyötysuhde</b>	<b>0,896</b>	

Polttoaineesta poistettava vesi pienentää polttoilman tehoja, joka vaikuttaa savukaasuhäviöihin. Kuivatulla polttoaineella savukaasuhäviö on noin 1,5 MW pienempi. Savukaasuhäviön pienentyessä loppulämpötila nousee, jolloin luvo:sta on mahdollista saada enemmän tehoa. Jos savukaasujen loppulämpötilat ovat samat kummassakin tapauksessa, niin saatu hyöty on sama kuin savukaasuhäviöiden erotus (1,5 MW).

Hyötysuhteeksi kuivaamattomalle polttoaineelle saadaan 89,1 %. Kun biopolttoaine kuivataan 25 %:iin, saadaan kattilahyötysuhteeksi 89,6 %. Hyötysuhde nousee tällöin 0,5 %. Polttoainetehon pysyessä vakiona kattilan häviöt pienenee 0,5 %.

### *Adiabaattinen palamislämpötila*

Kuivemmalla polttoaineella saavutetaan korkeampi adiabaattinen palamislämpötila. Se saadaan laskettua yhtälöstä (5.8) merkitsemällä jäähdytys- ja häviötermit nolliksi. Adiabaattisessa lämpötilassa otetaan huomioon syntyvien reaktiotuotteiden loppulämpötila polttoaineen palaessa jäähdyttämättömässä tulipesässä. Adiabaattinen palamislämpötila  $T_{sk}=T_{ad}$  saadaan iteroimalla. (Raiko 2002, 57) Taulukkoon 5.4. on laskettu adiabaattiset palamislämpötilat kuivaamattomalle ja kuivatulle polttoaineelle. Polttoainetehona käytetään samaa kuin kattilan hyötysuhdetta laskiessa (277 MW).

**Taulukko 5.4.** Adiabaattisten palamislämpötilojen vertaaminen.

Kuivaamaton biopolttoaine		Kuivattu biopolttoaine	
Savukaasun lämpöteho	309,7 MW	Savukaasun lämpöteho	309,1 MW
Adiabaattinen palamislämpötila	1532 °C	Adiabaattinen palamislämpötila	1650 °C

Adiabaattinen palamislämpötila nousee noin 118 °C. Lämpötilaan vaikuttaa polttoaineen lämpöarvo, ilmakerroin sekä jonkin verran palamisilman lämpötila (Huhtinen et al. 1994, 86). Sen tuomista eduista on kerrottu kappaleessa 2.1. Haittapuolena voi olla suurempi termisen typen oksidien ( $\text{NO}_x$ ) muodostuminen. Lisäksi kattiloille on määrätty maksimi adiabaattinen palamislämpötila. Mikäli tämä ylitetään, joudutaan todennäköisesti kierrätyskaasun määrää lisäämään primääri-ilmassa, jotta polttoa saadaan jäähdytettyä. Kierrätyskaasun lisääminen heikentää palamisprosessia, koska kaasun mukana tulee polttoon lisää muun muassa vettä. Adiabaattisen palamislämpötilan nouseminen on enemmän haitaksi leijupetikattilalle kuin kierto-leijupetikattilalle.

### *Happokastepiste*

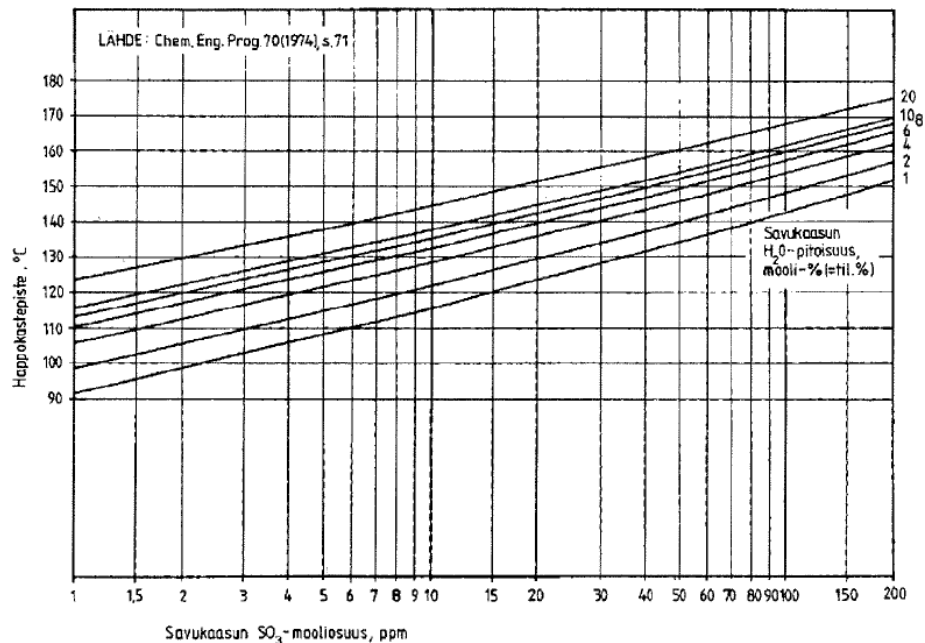
Osa poltossa muodostuneesta rikkidioksidista ( $\text{SO}_2$ ) reagoi edelleen rikkiatrioksidiksi ( $\text{SO}_3$ ). Energiantuotannossa suurin osa rikin oksidipäästöistä on rikkidioksidia. Yleensä alle 1-2 % rikki-päästöistä vapautuu rikkiatrioksidina. (Päästötietojen tuottamismenetelmät 2005, 55) Ympäristövaikutukset rikkidioksidilla ja -trioksidilla on samat, mutta kattilan käytön kannalta rikkiatrioksidilla on merkitystä. Rikkiatrioksidi reagoi herkästi savukaasussa olevan veden kanssa muodostaen rikkihappoa (yhtälö 5.10).



Jos pintojen lämpötila alittaa seoksen kastepisteen, voi muodostunut rikkihappo tiivistyä vesi-rikkihapposeokseksi. Tiivistynyt rikkihappo voi aiheuttaa korroosiota. Tämä niin sanottu happokastepiste on sitä korkeampi mitä enemmän savukaasuissa on vesihöyryä tai rikkiatrioksidia. (Iisa et al. 2002, 347–348)

Rikkitrioksidia muodostuu poltossa pääasiassa kahden mekanismin kautta: termisesti korkeissa lämpötiloissa ( $> 1100\text{ °C}$ ) ja katalyyttisesti matalissa lämpötiloissa ( $500\text{--}800\text{ °C}$ ). Rikkitrioksidin määrän on todettu riippuvan happipitoisuudesta. Mitä alhaisempi happipitoisuus on, sitä vähemmän rikkitrioksidia muodostuu. Erityisen merkittävää tämä on alhaisilla happipitoisuuksilla ( $0\text{--}1\%$ ). (Iisa et al. 2002, 347–348)

Kuvassa 5.4. on esitetty riippuvuus happokastepisteen ja rikkitrioksidipitoisuuden välillä. Riippuvuus on logaritminen, jonka vuoksi rikkitrioksidin määrää vähentämällä ei voida paljontaan vaikuttaa kastepisteeseen (Iisa et al. 2002, 348).



**Kuva 5.4.** Happokastepisteen riippuvuus savukaasujen rikkitrioksidipitoisuudesta (ilmansuojelu 2008, 22).

Happokastepisteen laskemiseen löytyy myös sovitteita. Tässä työssä on käytetty A.G. Okkesin menetelmää (katso Cooper 2008). Yhtälön (5.11) mukaisella sovitteella voidaan verrata kuivaamattoman ja kuivatun polttoaineen savukaasun happokastepisteitä.

$$t_d = 203,25 + 27,6 \cdot \log(p_{H_2O}) + 10,83 \cdot \log(C \cdot p_{SO_2}) + 1,06 \cdot [\log(C \cdot p_{SO_2}) + 8]^{2,19} \quad (5.11)$$

Sovitteessa  $t_d$  on happokastepiste celsius-asteina,  $p_{H_2O}$  ja  $p_{SO_2}$  ovat veden ja rikkidioksidin osapaineita sekä  $C$  on rikkitrioksidin osuus rikkidioksidista. Laskenta arvoina käytetään kuvissa 5.1 ja 5.2 olevia arvoja. Rikkitrioksidin osuudeksi rikkidioksidissa arvioidaan  $2\%$ . Happokastepisteeksi kuivaamattomalle polttoaineelle saadaan  $131,3\text{ °C}$  sekä kuivatulle  $130,6\text{ °C}$ . Lähteen Holmberg et al. (2000) mukaan kastepistelämpötilan pitäisi laskea, jolloin savukaasuhäviöt olisivat pienemmät. Happokastepisteiden ero on kuitenkin niin pieni, ettei savukaasun loppulämpötilan laskemisella ole merkitystä.

Laskuissa on otettava kuitenkin huomioon, että rikkitrioksidin muuntoprosentti sekä kuivatus polttoaineen ilmanosuus ovat arvioita. Nämä ovat asioita, jotka vaikuttavat suoraan happokastepisteeseen. Lisäksi sovitteen lähteessä ei ollut mainintaa virhemarginaalista.

### 5.3 Energiantuotanto

Riippuen siitä mitä lämmönlähdettä kuivurissa käytetään, vaikuttaa se prosessin eri osaluokkiin. Kaukolämmön paluuvesi lisää sähköntuotantoa, koska kaukolämmönvaihtimeen saadaan kylmempää jäähdytysvettä ja siten höyryn paisuntaa voidaan pidentää turbiinissa. Kaukolämmön menovesi sen sijaan vähentää kuluttajille menevää kaukolämpötehoa. Lauhteen käyttö lämmönlähteenä kasvattaa matalapainevaihtimien tehoa, mikäli lämpötila syöttövesisäiliöön halutaan pitää vakiona. Vaihtimien tehonnousu kasvattaa sähköntuotantoa. Prosessihöyryn käyttö kuivaukseen Rauhalahdessa kasvattaa sähkötehoa noin 1,5 MW tiettyyn rajaan asti. Arvioitu massavirta on tällöin noin 4-5 kg/s. Syynä tehon nousuun on turbiinin ahdas perä maksimimassavirroilla.

Savukaasun käytön vaikutukset näkyvät polttoprosessissa, mikäli se otetaan ennen ilman esilämmitintä. Silloin polttoilman lämmittämiseen jää vähemmän savukaasuvirtaa. Vaikka kuivauksessa savukaasun käyttö on käytännössä ilmaista, vaatii se muista lämmönlähteistä poiketen puhdistuksen, kierrätyksen takaisin kattilaan tai savukaasukanavaan.

Laskentaohjelmaan on pyritty rakentamaan höyryprosessia vastaava malli (liite 5), jotta saataisiin tarkasteltua eri lämmönlähteiden vaikutusta energiaproessiin. Mallissa ovat höyryprosessin pääkomponentit sekä energiavirrät. Se on pyritty tekemään TOPI-prosessiohjelmasta saatujen arvojen mukaisesti. Arvot ovat otettu 25.2.2010 kello 18:00–19:00 väliseltä ajalta, jolloin sähköntuotanto on ollut 86,4 MW. Turbiinin välilottojen arvot on otettu tarkasteluhetken paisuntasuoralta. Myös tuorehöyryn sekä polttoainetehon arvot ovat tarkasteluhetkestä. Lämmönvaihtimien arvot määräytyvät välilottohöyryarvojen sekä energiataseiden mukaan. Korkeapaine-esilämmittimissä käytetään prosessiohjelman antamia jälkiasteisuuksia.

Kaukolämpövaihtimissa pidetään maksimitehoa 140 MW, jonka mukaan määräytyvät kaukolämmön massavirrät. Prosessiohjelmasta otetussa mallissa kaukolämpöteho on 155 MW. Kaukolämmön meno- ja paluuveden sekä lauhteen lämpötilat ovat taulukon 4.4. mukaiset. Turbiinin mekaaninen hyötysuhde on 0,98 ja generaattorin 0,99. Syöttövesipumpun isentrooppinen hyötysuhde on 0,8 ja sähkömoottorin 0,9 (Saarno 2011). Näiden arvojen ja laskentojen perusteella mallin sähkötehoksi saadaan 80,8 MW. Ero sähkötehoissa johtuu laskentatarkkuuksista, häviöistä, eri suurista kaukolämpötehoista sekä siitä, että kyseisellä tarkasteluhetkellä on käytetty prosessihöyryä. Höyryn tarkkaa tehoa ja massavirtaa ei tiedetä. Mallin tarkoituksena onkin saada muutokset suhteina alkuperäisiin arvoihin nähden. Liitteessä 5 sinisellä merkatut arvot ovat muutettavissa olevia parametreja.

Tässä kappaleessa on tarkoitus suorittaa tarkastelu kaikille lämmönlähteille kappaleen 4 lähtöarvoilla. Tarkastelua ei tehdä savukaasulle, koska sillä ei ole vaikutusta energiaproessiin. Ulostulevien lämmönlähteiden lämpötilat ovat seuraavat:

- kaukolämpö paluu 20 °C
- kaukolämpö meno 50 °C
- lauhde 55 °C
- prosessihöyry 65 °C

Taulukossa 5.5. on laskettu laskentaohjelman mallilla muutokset sähkö- ja kaukolämpötehoissa. Positiivinen arvo on kasvattanut tehoa ja negatiivinen laskenut. Kaukolämpövaihtimien teho on pidetty vakiona 140 MW. Mikäli massavirtaa on pitänyt lisätä matalapaine-esilämmittimissä tai kaukolämpövaihtimissa, se on otettu syöttövesisäiliön väliotosta.

**Taulukko 5.5.** Sähkö- ja kaukolämpötehon muutokset kuivauksessa.

	Sähkö [MW]	Kaukolämpö [MW]	$\Delta P$ [MW]	$\Delta Q$ [MW]
Ei kuivatusta	80,83	140,00	0,00	0,00
Kaukolämpö paluu	81,05	140,00	0,23	0,00
Kaukolämpö meno	80,83	120,52	0,00	-19,48
Lauhde	81,26	140,00	0,43	0,00
Prosessihöyry	75,46	140,00	0,04	0,00

Käytettäessä kaukolämmön paluuvettä sähköteho kasvaa 0,23 MW. Kaukolämpötehoon sillä ei ole vaikutusta. Liitteen 5 malli kuvaa tilannetta, kun lämmönlähteenä käytetään kaukolämmön paluuvettä. Kaukolämmön menoveden käyttö kuivaukseen vaikuttaa ainoastaan kaukolämpötehoon, joka laskee 19,48 MW. Lauhdevesi puolestaan vaikuttaa sähkötehoon, joka kasvaa noin 0,43 MW, johtuen matalapaine-esilämmittimien tehon kasvusta. Jos syöttövesisäiliön välioton massavirta sekä sinne menevän syöttöveden lämpötila pidetään vakiona, sähköteho pienenesi 2,49 MW ja lämpöteho 16,48 MW. Prosessihöyryn käyttö kasvattaa sähkötehoa 0,04 MW. Jos tuotettuun sähkötehoon lisätään höyryn käytöstä saatava hyöty noin 1,5 MW, kasvaa sähköteho yhteensä 1,54 MW. Kaukolämpötehoon prosessihöyryn käytöllä ei ole vaikutusta. Jos syöttövesisäiliön välioton massavirta pidetään vakiona, sähköteho pienenesi 2,66 MW ja kaukolämpöteho 15,18 MW.

Pitää muistaa, että pidettäessä kaukolämpövaihtimien teho vakiona, syöttövesisäiliön massavirran pieneminen vie tehoja syöttövesisäiliöstä ja voi kasvattaa korkeapaine-esilämmittimien tehoa. Korkeapaine-esilämmittimien tehon nousu pienentää sähkötehoa. Tässä laskentamallissa syöttövesisäiliön tehon muutosta ei ole otettu huomioon.

## 6 TALOUDELLINEN TARKASTELU

Tarjouksien toimittajiksi pyritään valitsemaan tunnettu konserni, joka on eurooppalainen ja jolla on jo aiempia toimituksia biopolttoaineen kuivaukseen. Toimittajat etsitään internetistä hakukoneen avulla sekä Jyväskylän Energian työntekijöiden aiempien kokemusten perusteella. Tarjouksien toimittajiksi hihnakuivurin osalta valitaan itävaltalainen Andritz ja suomalainen Metso, jotka molemmat ovat isoja maailmalla tunnettuja yhtiöitä. Metsolla ei ole omaa kuivurikonseptia vaan he toimittavat sveitsiläisen Swiss Combin hihnakuivureita. Edellä mainitut yritykset toimittavat myös rumpukuivureita, mutta Andritzin rumpukuivuri vaatii kuivauskaasun lämpötilaksi 400–500 °C, joka on liian korkea laitokselta saataviin lämmönlähteisiin nähden. Vastaavasti Swiss Combi ei halua tarjota rumpukuivuria näin isoille biopolttoainekapasiteeteille. (Andritz 2011 & Metso 2010)

Rumpukuivurin tarjouksen toimittajiksi valitaan hollantilainen Vandenbroek ja brittiläinen Mitchell Dryers. Toimittajat ovat huomattavasti pienempiä yrityksiä kuin Andritz tai Metso, mutta heillä on rumpukuivureiden toimituksista pitkät referenssilistat. (Vandenbroek 2009 & Mitchell Dryers 2011)

Rauhalahden voimalaitoksessa on tarkoituksena nostaa biopolttoaineen osuus 30 %:sta 50 %:iin kokonaispolttoainetehosta. Tarjouspyynnöt lähetetään tämän tehonousun mukaisen massavirran mukaan. Liitteenä 6 on tarjouspyyntö hihnakuivurille. Rumpukuivurin tarjouspyyntö poikkeaa lämmönlähteiden määrässä. Rumpukuivuriin soveltuvat vain korkeat lämpötilat (höyry 170 °C ja savukaasu 230 °C).

Tarjouspyyntöön on kirjattu haluttu kuivurityyppi sekä sen sijoituspaikka. Teknisessä erittelyssä on sisään- ja ulostulokosteudet, biopolttoaineen kuiva-ainemassavirta, kuivattava materiaali, käytettävissä olevat lämmönlähteet sekä muita huomioon otettavia asioita. Sisääntulokosteudeksi on valittu 50 %, joka on hieman laskennallista arvoa korkeampi (taulukko 4.2.). Ulostulokosteus saa vaihdella välillä 25–20 %. Kuiva-aineen massavirraksi 50 % biopolttoaineteholla saadaan noin 8,8 kg/s. Lämmönlähteet ovat taulukon 4.4. mukaiset. Muita huomioitavia asioita on polttoaineen mahdollinen jäätyminen talviaikaan.

Tarjouspyynnössä pääkomponenttien hinnoittelu pyydetään esittämään erikseen. Lisäksi lämmön- ja sähkönkulutus sekä kunnossapitokustannukset on mainittava tarjouksessa. Tarjouksen lähettämiseksi annetaan aikaa noin kaksi viikkoa.

Kuivureiden investointikustannuksiin sekä kokonaiskustannuksiin vaikuttavat polttoaineen, energian, päästöoikeuksien ja lämmönlähteiden hinnat. Taulukossa 6.1. on listattu kaikki tarvittavat hinnat muuttuville kustannuksille.

**Taulukko 6.1.** *Muuttuvien kustannusten hinnat.*

Biopolttoaine	17,50 €/MWh
Turve	12,00 €/MWh
Sähkö, kesä	44,72 €/MWh
Sähkö, talvi	68,98 €/MWh
Kaukolämpö paluu	0,00 €/MWh
Kaukolämpö meno	21,90 €/MWh
Lauhde syöttövesisäiliöön	3,18 €/MWh
Prosessihöyry	22,70 €/MWh
Savukaasu	0,00 €/MWh
Päästöoikeudet	13,00 €/tCO <sub>2</sub>

Biopolttoaineen hinta koostuu teollisuuden sivutuotteesta (16,90 €/MWh), metsäpolttoaineen hakkeesta (20,10 €/MWh) ja murskasta (16,00 €/MWh). Polttoaineiden suhteet yhteishinnasta edellä mainitussa järjestyksessä on seuraavat 61,30 %, 23,18 % ja 15,52 %. Biopolttoaineiden sekä turpeen hinnat ovat Jyväskylän Energian ostohintoja (Salonen 2011). Sähkön hinnat ovat Nord Pool Spot pörssin vuoden 2010 keskihintoja (Nord Pool Spot 2011). Lämmönlähteet sekä päästöoikeudet ovat lähteen Saarno (2011) mukaan. Lämmönlähteiden hinnat ovat tyypillisiä omakustannehintoja.

## 6.1 Kuivurin investointikustannukset

Toimittajien budjettitarjouksien sisällöt poikkeavat toisistaan. Hihnakuivureista yksityiskohtaisempi tarjous on Andritzilla. Tarjouksessa on hyvin esitetty prosessin lämmönlähteiden tehontarpeet, joka helpottaa kokonaiskustannuksien laskemista. Tarjouksessa on lisäksi kerrottu kuivurin jokaisen osakokonaisuuden toimintaperiaate sekä rakenne. Vastaavasti Metson tarjouksessa prosessin lämmönlähteiden tehoja ei ole mainittu. Hyvänä puolena Metson tarjouksessa on kuivurin hinnoittelu erisuuruisten lämmönlähteiden mukaan. Rumpukuivuritoimittajista Vandenbroekin tarjouksessa on selkeästi lueteltu suunnitteluparametrit. Mitchell Dryersin tarjous on lyhyt ja tiedoiltaan puutteellinen. Esimerkiksi lämmönlähteen määrää, sähkönkulutusta eikä toimintaperiaatetta ole mainittu. Kaikki tarjoukset poikkeavat toimitusrajoiltaan hieman toisistaan.

Kuivurin lisäksi on pyydetty hinta-arvioita muun muassa rakennuksen perustukselle, lämmönvaihtimille sekä palontorjuntajärjestelmälle. Taulukossa 6.2. on listattu kiinteiden kustannusten hintoja.

**Taulukko 6.2.** *Kiinteiden kustannusten hinnat.*

Lämmönvaihdin (vesi-vesi)	10,00–97,00	k€
Lämmönvaihdin (kaasu-vesi)	250,00	k€
Sähköistys (kuivaimen ulkopuolinen)	50,00	k€
Automaatio (kuivaimen ulkopuolinen)	10,00	k€
Sammutusjärjestelmä	35,00	k€
Kuljetin kuljetinsillalla	4,90	k€/m
Kuljetin sisätilassa	2,90	k€/m
Putkimetrin hinta	0,01	k€/m
Perustukset	0,80	k€/m <sup>3</sup>

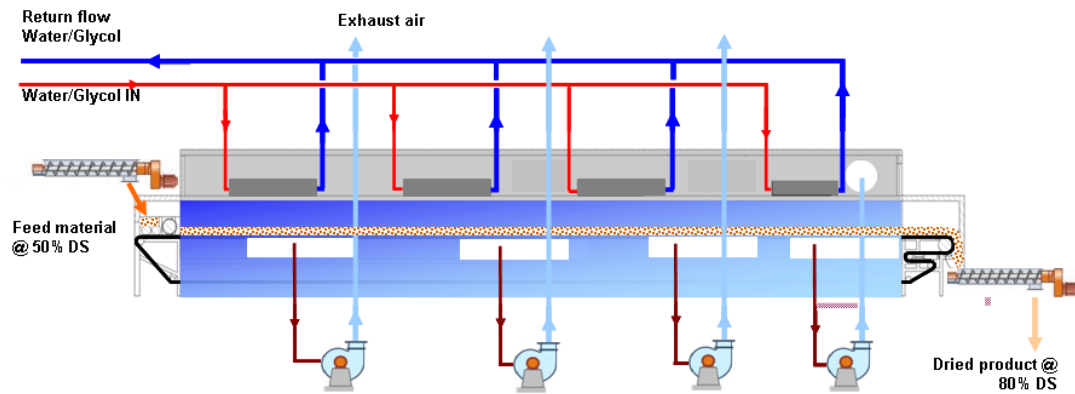
Kaikki taulukon 6.2. hinnat ovat arvioita. Lämmönvaihtimen hinta määräytyy tehon ja lämpötilojen mukaan. Vesi-vesi lämmönvaihtimien tarjoukset ovat Alfa Laval:lta. Kaasu-vesi lämmönvaihtimen (ekonomaiseri) hinta-arviota on pyydetty Metso Power:lta, mutta tarjousta ei saatu, koska toimittajan mukaan ekonomaiserin veden alhainen sisääntulolämpötila aiheuttaa syöpymisriskin lämmönvaihtimessa (Rantonen 2011). Kaasu-neste lämmönvaihtimen hinta-arvio on lähteen Saarno (2011) mukaan. Lämmönvaihtimien hinnat eivät sisällä asennusta.

Sammutusjärjestelmän hinta-arvio on pyydetty Firecon Groupilta, mutta sitä ei ole saatu. Sammutusjärjestelmän hinnaksi arvioidaan 35 k€. Kuljettimien metrihinnat perustuvat Raumasterin arvioon. Sähköistyksen ja automaation kustannukset perustuvat lähteen Saarno (2011) arvioon. Putkimetrin hinta perustuu usean eri putkikoon keskihintaan. Perustuksen hinta-arvio on saatu SR-Talotekniikka Oy:stä. Arvio sisältää maanrakennustyöt, muotituksen, raudoituksen, betonin sekä itse työn. Seuraavissa kappaleissa on käyty läpi jokaisen toimittajan tarjous tarkemmin.

### 6.1.1 Andritzin hihnakuivuri

Andritzin tarjous sisältää yhden matalalämpöhihnakuivurin osittaisella kaasun kierrolla, suunnittelun sekä asennuksen ja käyttöönoton. Kuivurin periaatekuva on esitetty kuvassa 6.1. Kuivurissa kiertää erillinen oma vesiglykolipiiri, jota lämmitetään kolmella lämmönlähteellä: savukaasulla, lauhteella ja kaukolämmön menovedellä. Kuivuri on mitoitettu 20 %:n loppukosteudelle. Kun biopolttoaineen alkukosteus on 50 % ja kuiva-aineen massavirta 8,8 kg/s, poistettavan veden määräksi tulee 23,76 t/h. Vesiglykolipiiri lämmitetään noin 110 °C:een.





**Kuva 6.1.** Andritzin hihnakuivuri.

Toisin kuin kappaleessa 4.2.2 monivaihekuivurin toimintaperiaatteesta on kerrottu, edellisen kuivausvaiheen kuivauskaasuja ei kierrätetä seuraavaan vaiheeseen. Tämän ratkaisun toteuttaminen ei ole taloudellisesti osoittautunut järkeväksi (Havu 2011). Andritz on sen sijaan tehostanut kuivatustaan kierrättämällä viimeisen vaiheen kuivauskaasut.

Kuivurilla on pituutta 56 metriä, leveyttä 19 metriä ja korkeutta 10 metriä. Kuivuri rakennetaan moduuleista, joka sisältää syöttö- ja poistopäädyn, 13 kappaletta lämmönvaihdinmoduuleja, 3 kappaletta poistoilmapuhaltimia sekä yhden kappaleen kiertoilmapuhaltimia. Toimitusrajana on metri kuivurista, johon tilaajan on tuotava kaikki putkitukset ja sähköistykset. Tilaajan vastuulle jää lisäksi perustuksien teko, kuivurin ulkopuoliset kuljettimet sekä kaikki muu rakennussuunnittelu. Taulukkoon 6.3. on laskettu hihnakuivurille kiinteiden kustannuksien kokonaishinta.

**Taulukko 6.3.** Andritzin hihnakuivurin kiinteät kustannukset.

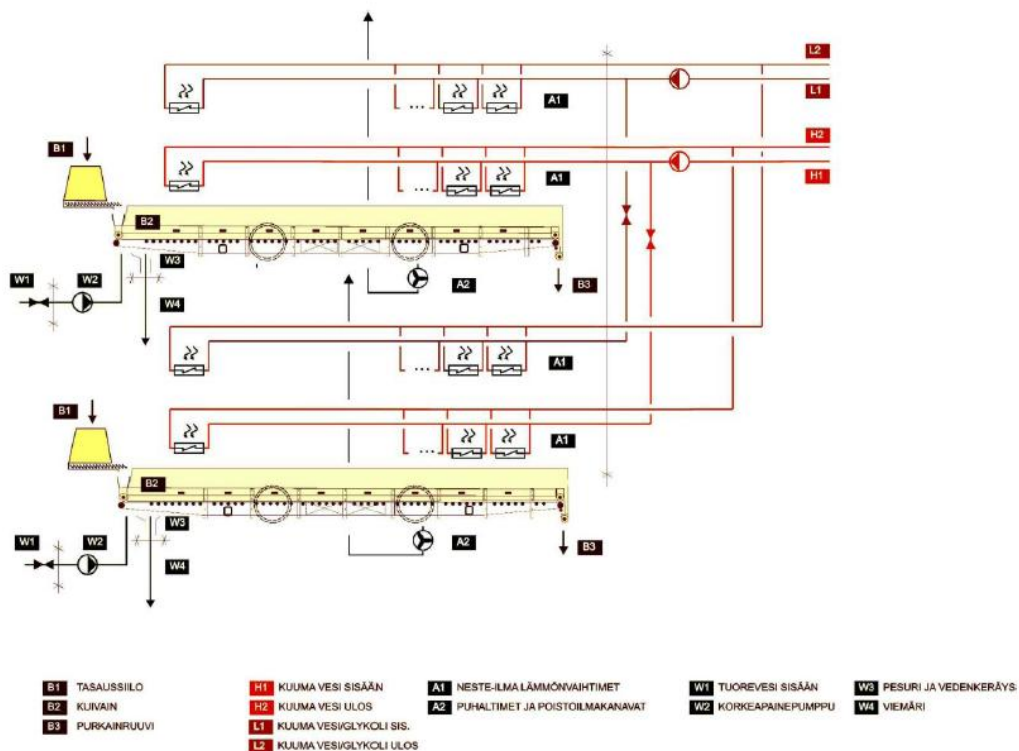
Hihnakuivuri	2 800,00 k€
Välivarasto	201,00 k€
Perustukset	560,00 k€
Lämmönvaihdin, savukaasu	250,00 k€
Lämmönvaihdin, lauhde	23,60 k€
Lämmönvaihdin, kaukolämpö meno	37,00 k€
Kuljettimet	147,00 k€
Sähköistys	50,00 k€
Automaatio	10,00 k€
Putkitus	8,00 k€
<b>Yhteensä</b>	<b>4 086,60 k€</b>

Tarjouksessa on erikseen tarjottu märälle biopolttoaineelle välivarastoksi siloa, jolla saadaan varmistettua jatkuva massavirta kuivurille. Lisäksi vaatimuksena on, että polttoaine pitää seuloa ja sen pitää olla sulanutta ennen kuivuriin tuloa. Tarvittava seulonta suoritetaan nykyisillä laitteilla. Perustuksen määräksi on arvioitu puolen metrin paksuinen valu. Lämmönvaihtimia tulee kolme kappaletta. Kuljettimia kuljetinsillalla on arvioitu menevän 30 metriä. Sisätiloihin kuljettimia ei tarvita. Sähköistys sisältää jänniteja-

kelun kuivurille. Automaatio sisältää kuivurin automaation liittämisen laitoksen automaatiojärjestelmään. Putkia on arvioitu menevän yhteensä 800 metriä. Putkimäärä sisältää vesiglykolipiirin putkituksen kuivurilta lämmönvaihtimille. Yhteensä kuivurin hankintahinnaksi jää noin 4 086,60 k€.

### 6.1.2 Metson hihnakuivuri

Metson tarjous sisältää kaksi matalalämpöhihnakuivuria, suunnittelun sekä asennuksen ja käyttöönoton. Kuivurin periaatekuva on esitetty kuvassa 6.2. Kuivurissa on kaksi erillistä lämpöpiiriä: vesiglykolipiiri sekä kuumavesipiiri. Vesiglykolipiiri lämmitetään kaukolämmön paluuedellä ja kuumavesipiiri kaukolämmön menovedellä. Tehontarpeet riippuvat kuivauskaasun lämpötilasta, joita on tarjoukseen eritelty kolme kappaletta 100 °C, 70 °C ja 60 °C. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä halvempi hankintahinta kuivurilla on. Kuivurin loppukosteudeksi on mitoitettu 25 %. Tällöin poistettava vesimäärä on 21,13 t/h. Kuivurissa kuivauskaasu lämmitetään ensin vesiglykolipiirissä ja sen jälkeen loppulämpöönsä kuumavesipiirissä. Metson monivaihekuivuri ei myöskään kierrätä edellisen kuivausvaiheen kuivauskaasuja seuraavaan vaiheeseen.



**Kuva 6.2.** Metson hihnakuivuri.

Kuivurirakennuksella on pituutta noin 60 metriä, leveyttä noin 11 metriä ja korkeutta 15 metriä. Tilantarpeen säästämiseksi kuivurit asennetaan päällekkäin. Toimitusrajana on metri kuivurista, johon tilaajan on tuotava kaikki putkitukset ja sähköistykset. Tilaajan vastuulle jää lisäksi perustuksien teko, kuivurin ulkopuoliset kuljettimet, yleis-

sähköistys ja valaistus sekä palontorjuntaan liittyvät laitteistot. Taulukkoon 6.4. on laskettu hihnakuivurille kiinteiden kustannuksien kokonaishinta. Kuivurin hinta on korkeimman lämpötilan mukaan (100 °C).

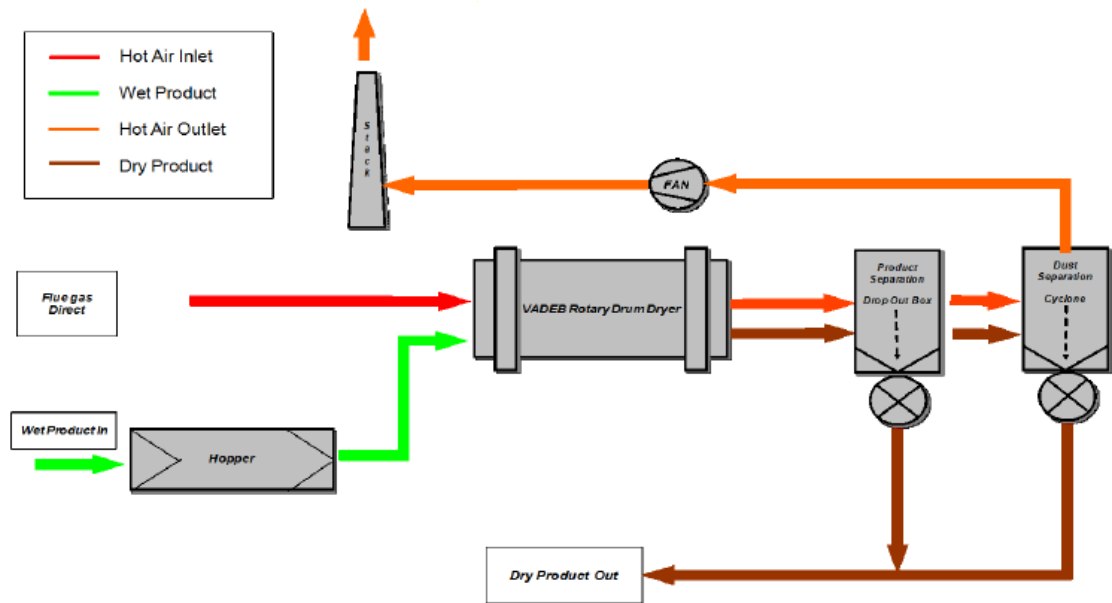
**Taulukko 6.4.** Metson hihnakuivurin kiinteät kustannukset.

Hihnakuivuri	4 850,00 k€
Perustukset	560,00 k€
Lämmönvaihdin, kaukolämpö paluu	97,00 k€
Lämmönvaihdin, kaukolämpö meno	39,20 k€
Kuljettimet	147,00 k€
Sähköistys	50,00 k€
Automaatio	10,00 k€
Putkitus	13,00 k€
Sammutusjärjestelmä	35,00 k€
<b>Yhteensä</b>	<b>5 801,20 k€</b>

Perustuksen määräksi on arvioitu sama määrä kuin Andritzin kuivurissa. Lämmönvaihtimia tulee kaksi kappaletta. Kuljettimia kuljetinsillalla on arvioitu menevän 30 metriä. Sisätiloihin kuljettimia ei tarvita. Sähköistys sisältää jännitejakelun kuivurille. Automaatio sisältää kuivurin automaation liittämisen laitoksen automaatiojärjestelmään. Putkia on arvioitu menevän yhteensä 1300 metriä. Putkimäärä sisältää vesiglykoli- sekä kuumavesipiirin putkituksen kuivurilta lämmönvaihtimille. Yhtenä erona Andritzin toimitukseen on, ettei Metso toimita palosammutusjärjestelmää. Yhteensä kuivurin hankintahinnaksi jää noin 5 801,20 k€, kun kuivauskaasun loppulämpötila on 100 °C. Mikäli kuivauskaasun lämpötilana käytettäisiin 70 °C, kustannukset nousisivat 600 k€ ja vastaavasti 60 °C:lla 1 600 k€. Kappaleessa 6.2.2 tehdään kokonaiskustannusvertailu kaikkien kolmen kuivurin välillä.

### 6.1.3 Vandenbroekin rumpukuivuri

Vandenbroekin tarjous sisältää yhden rumpukuivurin, suunnittelun sekä asennuksen ja käyttöönoton. Rumpukuivurin pääkomponentteihin kuuluvat savukaasun jakotukki, polttoaineen syöttösuppilo, rumpu ja sen kannattimet, käyttölaiteisto, polttoaineen erotin, sykloni sekä savupiippu. Kuivurin periaatekuva on esitetty kuvassa 6.3. Kuivurissa käytetään lämmönlähteenä savukaasua.



**Kuva 6.3.** Vandenbroekin rumpukuivuri.

Maksimi vedenerotusmäärä on noin 11 t/h, kun polttoaine kuivataan 20 %:iin. Tämä on noin puolet vaaditusta määrästä. Kuivureita tarvittaisiin kaksi kappaletta, jotta päästäisiin tavoitekapasiteettiin. Kahden rumpukuivurin kustannus on 5 994,30 k€. Tilaajan vastuulle jää rakennus, kuivurin ulkopuoliset kuljettimet ja yleissähköistys.

Kahden rummun vaatima savukaasuvirta on 420 t/h. Tämä on yli 80 % kattilan koko savukaasuvirrasta, joka on yli suositeltavan rajan 33,3 %. Savukaasun massavirta tulee niin suureksi, että koko kattilan peräpään mitoitus tulisi tarkentaa ja todennäköisesti palamisilmojen lämmöt jäisivät laahaamaan pahasti ja kattilahyötysuhde laskisi (Saarno 2011).

Vandenbroek ehdottaa maksimi savukaasuvirralla käytettäväksi rumpukuivuria lisäpolttimella. Lisäpolttimella savukaasuvirran lämpötila nostetaan 230 °C:sta 450 °C:een. Lisäpoltin tarvitsee arviolta 20 MW:n tehon. Tämä teho jouduttaisiin tekemään todennäköisesti öljyllä, mikä kasvattaa polttoainekustannuksia sekä päästöjen määrää. Vandenbroek ei lähettänyt uutta tarjousta rumpukuivurista lisäpolttimella diplomityön suunnitellun aikataulun puitteissa. Näistä syistä johtuen Vandenbroek:n rumpukuivurille ei tehdä kokonaiskustannustarkasteluja.

#### 6.1.4 Mitchell Dryersin rumpukuivuri

Mitchell Dryersin tarjous sisältää yhden rumpukuivurin. Rumpukuivuriin kuuluu tuuloimapuhallin ja suodatin, syöttösuppilo, rumpu ja sen kannattimet, käyttölaitteisto, poistopuhallin, poistoyhde sekä instrumentointi ja ohjauskeskus. Tilaajalle jää perustuksien teko sekä putkitus ja sähköistys rumpukuivurille.

Rumpu on 3,3 metriä halkaisijaltaan ja 26 metriä pitkä. Veden haihdutuskapasiteettiä sillä on 2,97 t/h. Tarjouksen mukaisia rumpuja tarvitaan siis yhteensä 8 kappaletta,

jotta vaadittu haihdutusmäärä 23,76 t/h saavutetaan (kuivatus 20 %:iin). Yhden rumpukuivurin hinta on 840,00 k€ eli noin 973,35 k€. Pelkkien rumpukuivureiden kustannus on 7 786,80 k€.

Tarjouksessa ei mainita vaadittavaa lämmönlähteen massavirtaa. Olettaa voi, että mitoitus on tehty savukaasulle. Todennäköisesti savukaasun massavirta tulee niin suureksi, että ongelmat olisivat samat kuten Vandenbroekin tapauksessa. Lisäksi jokainen rumpu vaatisi omat syöttö- ja poistokuljettimet. Kuljettimet ja rumpujen määrä kasvat- taisi tilantarvetta todella paljon. Näistä syistä sekä hankintahinnoista johtuen Mitchell Dryers rumpukuivurille ei tehdä kokonaiskustannustarkasteluja.

## 6.2 Kokonaiskustannukset

Kokonaiskustannuksissa otetaan huomioon investointikustannuksien lisäksi vuotuiset muuttuvat kustannukset, jotka on esitetty taulukossa 6.1. Seuraavissa kappaleissa on käyty läpi Andritzin sekä Metson hihnakuivureiden kokonaiskustannukset. Kustannus- ten pohjalta lasketaan kuivurille takaisinmaksuaika, nettonykyarvo sekä tehdään her- kkyysanalyysi. Herkkyysanalyysissä muutettavia parametrijointoja ovat sähkö, kauko- lämmön omakustannehintaa, biopolttoaine, turve sekä päästöoikeudet. Laitoksen käyttö- aika vuodessa on 5000 h ja sitä on arvioitu ajettavan vuoteen 2030 asti. Suurin osa käyt- töajasta kohdistuu talvikaudelle, joten kannattavuuslaskut tehdään sen mukaan. Lähtee- nä kannattavuuslaskuissa on käytetty Raiko (2010) ja herkkyysanalyysissä Ryymin (2011).

### 6.2.1 Andritzin hihnakuivuri

Muuttuvat kustannukset kertyvät biopolttoaineesta, turpeesta, päästöoikeuksista, puhallin-, sähkö- ja kaukolämpötehoista sekä kuivuriin liittyvistä kustannuksista. Kuivurin kustannuksiin kuuluu lämmönlähteet, sähkön kulutus sekä kunnossapitokustannukset. Kuivurin lämmönlähteiden kustannuksissa ei oteta huomioon kaukolämpöä, vaan se huomioidaan energiantuotannossa menetetyssä kaukolämpötehoissa. Kuivurin käyttö- henkilöille ei lasketa kustannuksia, koska kunnossapito ja valvonta suoritetaan olemassa olevalla henkilöstöllä.

Muuttuville kustannuksille tehdään kaksi erillistä tarkastelua. Ensimmäisessä tarkas- telussa oletetaan biopolttoaineen määrän säilyvän vakiona, jolloin voidaan vähentää turvetta. Toisessa tarkastelussa oletetaan turpeen määrä vakioksi, jolloin voidaan vähen- tää biopolttoaineen määrää.

Jokaiselle muuttuvalle kustannukselle lasketaan vuosikohtaiset kustannukset kerto- malla keskenään käyttöaika, yksikköhinta sekä teho. Biopolttoaineen käytöstä kertyy säästöä, koska saman tehon saamiseksi tarvitaan vähemmän polttoainetta. Säästyneen biopolttoaineen teho lasketaan saapumistilassa olevien polttoaineiden massavirtojen eroista. Siinä verrataan tilanteita, joissa biopolttoaineen ja turpeen määrä pidetään va- kiona.

Turpeen käytöstä kertyy säästöä, koska kuivaamattomalla biopolttoaineella turpeen teho talviaikaan on 150,0 MW ja kuivatulla 136,7 MW. CO<sub>2</sub>-päästöoikeudet vähenevät samaisen turpeen tehon pienenemisen johdosta. Turpeelle päästökerroin on 377,43 kg/MWh (Polttoaineluokitus 2005).

Kuivauksen ansiosta savukaasun sekä polttoilman määrä pienenee, jolloin puhaltimien tehontarve laskee. Tehon muutos otetaan huomioon primääri-, sekundääri-, kiertokaasu- ja savukaasupuhaltimissa. Tehon muutokset luetaan puhallinkäyrästä, josta saadaan puhaltimen ottoteho tilavuusvirran perusteella. Ilman ja savukaasun tilavuusvirtoina on käytetty laskentaohjelmasta saatuja arvoja, joiden laskenta perustuu kappaleeseen 5.1. Puhaltimien tehon muutokset ovat seuraavat:

- primääripuhallin (2 kpl) 0,04 MW
- sekundääripuhallin 0,10 MW
- kiertokaasupuhallin 0,01 MW
- savukaasupuhallin 0,15 MW

Sähkö- ja kaukolämpötehon muutokset saadaan laskentaohjelman prosessimallista. Kuivurilla varustettua prosessia verrataan tuotantoarvoihin, jossa ei käytetä kuivuria. Pidettäessä biopolttoaineen määrä vakiona sähköteho kasvaa noin 0,19 MW ja kaukolämpöteho laskee noin 17,4 MW. Turpeen määrän ollessa vakio sähköteho kasvaa noin 0,18 MW ja kaukolämpöteho laskee noin 16,0 MW. Kuivurin lämmönkulutuksessa otetaan huomioon lauhteesta sekä savukaasuista syntyvät kustannukset. Kuivurin sähkönkulutukseksi toimittaja on arvioinut 0,55 MW. Kunnossapitokustannuksia kertyy 60 k€ vuodessa. Kunnossapitokustannukset ovat noin 2,1 % kuivurin hankintahinnasta. Taulukossa 6.5. on vertailtu kahden eri tarkastelun muuttuvia kustannuksia, kuivurin takaisinmaksuaikaa sekä nettonykyarvoa.

**Taulukko 6.5.** Andritzin hihnakuivurin muuttuvat kustannukset, takaisinmaksuaika sekä nettonykyarvo.

	Biopolttoaineen määrä vakio	Turpeen määrä vakio	
<b>Biopolttoaineesta säästöä</b>	<b>0</b>	<b>1 077 838</b>	<b>€/a</b>
<i>Turve</i>			
Ennen kuivausta	9 000 000	9 000 000	€/a
Kuivauksen jälkeen	8 194 894	9 000 000	€/a
<b>Erotus</b>	<b>805 106</b>	<b>0</b>	<b>€/a</b>
<i>CO<sub>2</sub> päästöoikeudet</i>			
Ennen kuivausta	3 679 943	3 679 943	€/a
Kuivauksen jälkeen	3 350 749	3 679 943	€/a
<b>Erotus</b>	<b>329 194</b>	<b>0</b>	<b>€/a</b>
<b>Puhaltimista säästöä</b>	<b>103 470</b>	<b>103 470</b>	<b>€/a</b>
<i>Sähköteho</i>			
Ennen kuivausta	27 878 155	27 878 155	€/a
Kuivauksen jälkeen	27 944 395	27 918 141	€/a
<b>Erotus</b>	<b>66 240</b>	<b>60 651</b>	<b>€/a</b>
<i>Kaukolämpöteho</i>			
Ennen kuivausta	15 330 000	15 330 000	€/a
Kuivauksen jälkeen	13 424 861	14 164 369	€/a
<b>Erotus</b>	<b>-1 905 139</b>	<b>-1 748 707</b>	<b>€/a</b>
<i>Kuivuri</i>			
Kuivurin lämmönkulutus	173 387	106 084	€/a
Kuivurin sähkönkulutus	189 695	189 695	€/a
Kunnossapitokustannukset	60 000	60 000	€/a
<b>Yhteensä</b>	<b>-423 082</b>	<b>-408 845</b>	<b>€/a</b>
<b>Muuttuvat yhteensä</b>	<b>-1 024 213</b>	<b>-915 593</b>	<b>€/a</b>
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>Ei TMA</b>	<b>Ei TMA</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-16 464 538</b>	<b>-15 151 835</b>	<b>€</b>

Vasemmanpuoleiset arvot kuvaavat tilannetta, kun biopolttoaineen määrä on vakio. Tällöin kuivuri tuottaa vuodessa tappiota 1024,2 k€. Koska vuotuiset kulut ovat suuremmat kuin menot, takaisinmaksuaikaa (TMA) ei voida määrittää, joten investointi ei ole kannattava. Takaisinmaksuaika ei osoita investoinnin kannattavuutta, vaan rahoitusvaikutusta. Lisäksi menetelmässä ei oteta huomioon korkoa. Siksi on hyvä käyttää takaisinmaksuajan menetelmän rinnalla myös toista menetelmää, joka huomioi koron sekä ajan.

Tässä työssä toiseksi investoinnin kannattavuuden määritelmäksi on valittu nettonykyarvo, jossa tuotot/kulut diskontataan nykyhetkeen valitulla korkokannalla sekä takaisinmaksuajalla. Korkokantana laskuissa on käytetty 5 % ja takaisinmaksuajana laitoksen arvioituja toimintavuosia (19 vuotta). Kuivurin jäännösarvoksi oletetaan 0 €. Investointi on kannattava jos perushankintakustannusten (negatiivinen arvo) ja tulevien nettotuottojen summa on vähintään yhtä suuri tai suurempi kuin nolla. Myöskään nettonykyarvolla laskettaessa investointi ei ole kannattava.

Taulukon oikeanpuoleiset arvot kuvaavat tilannetta, kun turpeen määrä on vakio. Tällöin kuivuri tuottaa vuodessa tappiota 915,6 k€. Tappiosta johtuen takaisinmaksuaikaa ei saada laskettua. Myös biopolttoainetta vähennettäessä nettonykyarvo on negatiivinen. Näiden laskelmien perusteella Andritzin hihnakuivuri ei ole kannattava. Syynä kuivurin kannattamattomuuteen voidaan pitää kaukolämmön menoveden korkeaa omakustannehintaa.

Biopolttoaineen massavirran laskiessa kuivuriin syötettävä kuiva-ainemäärä pienenee noin 0,6 kg/s. Tämä massavirran laskeminen saattaa pienentää kuivurin hankintahintaa, mutta tämä pitäisi varmistaa toimittajalta. Myös poistettavan veden määrä vähenee, jolloin kuivurissa tarvitaan lämpöenergiaa noin 2,8 MW vähemmän. Tämän johdosta lämmönvaihtimet pienenevät hieman, mikä saattaa vaikuttaa hintaan.

Taulukossa 6.6. on laskettu muutos kattilaprosessissa sekä savukaasuissa kuivaamattoman ja kuivatun polttoaineen välillä. Vertailu on tehty kahden laskentatavan välillä.

**Taulukko 6.6.** Muutos kattilaprosessissa sekä savukaasuissa Andritzin hihnakuivurilla.

	Biopolttoaineen määrä vakio	Turpeen määrä vakio	
Kattilan hyötysuhde	0,66	0,55	%
Adiabaattinen palamislämpötila	208	195	°C
Happokastepiste	-1,6	-1,0	°C
Savukaasuvirta	-13,9	-13,2	%
Hiiidioksidivirta	-9,6	-9,3	%
Rikkidioksidivirta	-13,0	-6,3	%

Taulukon arvoista huomataan, että mitä enemmän käytetään biopolttoainetta sitä positiivisempi vaikutus sillä on. Tällöin kattilan hyötysuhde kasvaa yli 0.6 %. Molemmissa tapauksissa savukaasun arvot laskevat. Ainoa ero on rikkidioksidin määrässä, jota syntyy enemmän turpeen määrän ollessa vakio. Tämä johtuu turpeen korkeasta rikkipitoisuudesta. Biopolttoainemäärän ollessa vakio kattilan adiabaattinen palamislämpötila kasvaa noin 208 °C ja happokastepiste laskee noin 1,6 °C verrattaessa kuivaamattomaan polttoaineeseen.

### ***Herkkyysanalyysi***

Herkkyysanalyysissä tutkitaan kuinka investoinnin kannattavuus muuttuu, jos yhtä tai useampaa parametria muutetaan. Tärkeintä on tutkia ja löytää epäedullisimmat arviointivirheet, joiden löytymisen jälkeen voidaan kriittisemmin arvioida investoinnin kannattavuus. Liitteenä 7 on malli Andritzin hihnakuivurin herkkyysanalyysistä, kun biopolttoaineen määrä on vakio.

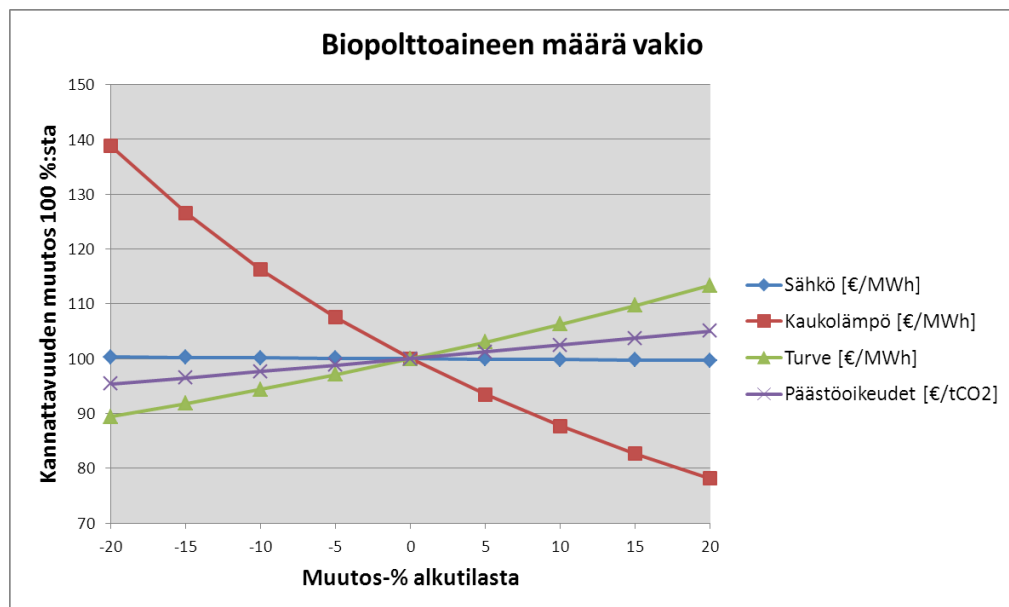
Herkkyysanalyysin yläosassa on hintaparametrit, joita muuttamalla saadaan selville kunkin hinnan vaikutus kannattavuuteen. Muutos annetaan prosentuaalisena muutoksena vuodesta 2013 lähtien. Inflaatio vaikuttaa biopolttoaineen ja turpeen hintaan. Lopuil-



le parametreille on omat muutosprosenttinsa. Hintamuutoksen vaikutusajan voi säätää maksimissaan vuoteen 2030 asti.

Tuloslaskelmaan on laskettu tulot ja menot. Kate saadaan vähentämällä tuloista menot. Poistot on laskettu annuiteetilla. Oletuskorkokantana on 5 % ja takaisinmaksuaika 19 vuotta. Vuotuinen kannattavuus saadaan laskemalla kate ja poistot yhteen. Kumulatiivinen kannattavuus saadaan laskemalla yhteen vuotuinen kannattavuus sekä edellisvuosien kannattavuudet. Kumulatiivinen kannattavuus kuvastaa pidemmän aikavälin voitto tai tappiota.

Tarkastellaan yksi parametri kerrallaan muutosta 5 % välein. Tarkasteluväliksi valitaan -20–20 %. Lähtöarvoista tehdään 100 %:n taso, johon kunkin parametrin prosentuaalisia muutoksia verrataan. Kuvassa 6.4. on tehty herkkyyssanalyysi biopolttoaineen määrän ollessa vakio. Tällöin biopolttoaineen kustannuksista ei tule säästöjä/tappioita.



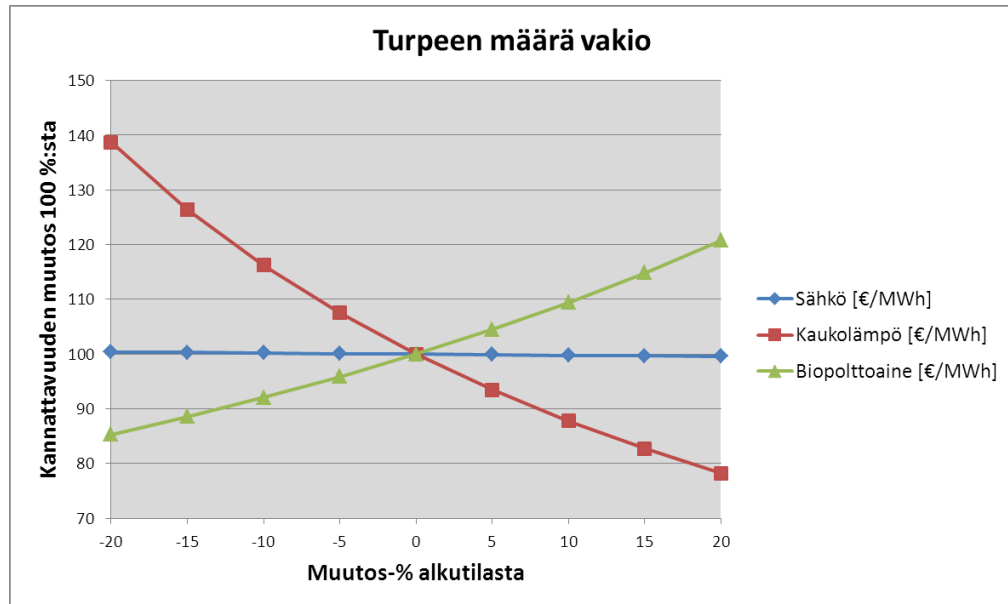
**Kuva 6.4.** Herkkyyssanalyysi biopolttoaineen määrän ollessa vakio.

Sähkön hinnalla ei ole vaikutusta kannattavuuteen. Positiivinen muutos laskee kannattavuutta hieman, mutta tämä on käytännössä merkityksetön. Kuvaajasta huomataan selvästi kaukolämmön suuri vaikutus kannattavuuteen. Jotta kannattavuus kasvaisi, pitäisi kaukolämmön hinnan laskea. Turpeella ja sen päästöoikeuksien kasvulla on positiivinen vaikutus kannattavuuteen.

Tarkastellaan kaukolämmön, turpeen ja päästöoikeuden muutosta erikseen. Muutetaan parametreja niin kauan, että viimeisen vuoden kumulatiivinen kannattavuus on nolla. Tällöin kuivurin ei siis odoteta tuottavan tulosta/tappiota käyttöajan puitteissa. Kaukolämmön omakustannehinta pitäisi laskea vuodessa 14,4 %. Viimeisenä vuotena hinnaksi tulisi 1,34 € ja ensimmäinen kannattava vuosi olisi 8. toimintavuosi. Vastavasti turpeella muutosta pitäisi olla 10,0 % vuodessa. Viimeisenä vuotena turpeen hinnaksi tulisi 66,7 €/MWh ja ensimmäinen kannattava vuosi olisi 12. toimintavuosi. Pääs-

töoikeuksien pitäisi nousta 15,9 % vuodessa. Viimeisenä vuotena päästöoikeuden hinnaksi tulisi 185,4 €/t<sub>CO2</sub> ja ensimmäinen kannattava vuosi olisi 13. toimintavuosi. Nämä prosentuaaliset muutokset ovat käytännössä mahdottomia.

Kuvassa 6.5. on tehty sama herkkyyssanalyysi turpeen määrän ollessa vakio. Tällöin turpeen ja päästöoikeuksien kustannuksista ei tule säästöjä/tappioita.



**Kuva 6.5.** Herkkyyssanalyysi turpeen määrän ollessa vakio.

Myös turpeen määrän ollessa vakio, sähkön hinnanmuutoksella ei ole vaikutusta kannattavuuteen. Suurin vaikutus on myös tässä tapauksessa kaukolämmöllä, jonka pitäisi laskea vuodessa 14,5 %, jotta viimeisen vuoden kannattavuus olisi nolla. Biopolttoaineen hinnan muutosta pitäisi olla 7,9 % vuodessa. Biopolttoaineen hinnaksi muodostuisi viimeisenä toimintavuotena 69,0 €/MWh ja ensimmäinen kannattava vuosi olisi 12. toimintavuosi. Biopolttoaineen prosentuaalinen muutos on pienempi mitä turpeen hinnalla, mutta kasvu olisi tässäkin tapauksessa mahdoton. Ottaen huomioon kummankin tapauksen prosentuaaliset muutokset, Andritzin hihnakuivurista ei saada kannattavaa.

## 6.2.2 Metson hihnakuivuri

Metson hihnakuivurin ulostulokosteudeksi on mitoitettu 25 %. Tästä johtuen biopolttoaineesta, turpeesta ja CO<sub>2</sub>-päästöoikeuksista kertyvät säästöt ovat pienemmät kuin Andritzilla. Kuivatun turpeen teho talviaikaan on 138,4 MW. Puhaltimien tehon lasku oletetaan samaksi kuten Andritzilla, vaikka savukaasua syntyy hieman enemmän.

Metson hihnakuivurille lasketaan kolme eri kustannusarviota, kullekin lämpötilatasolle omansa (katso kappale 6.1.2). Prosessin sähköteho kasvaa kuivauskaasun lämpötilasta sekä biopolttoaineen käytöstä riippuen 0,05–0,18 MW ja kaukolämpöteho laskee

noin 15,3–18,6 MW. Kuivurin sähkönkulutukseksi toimittaja on arvioinut 0,55 MW. Kunnossapitokustannuksia on arvioitu kertyvän 60 k€ vuodessa. Kunnossapitokustannukset ovat noin 1,0 % kuivurin hankintahinnasta. Taulukossa 6.7. on kuivurin takaisinmaksuaika sekä nettonykyarvo, kun biopolttoaineen sekä turpeen määrä on vakio.

**Taulukko 6.7.** Metson hihnakuivurin takaisinmaksuaika sekä nettonykyarvo.

Biopolttoaineen määrä vakio				
Lämmönlähde	100 °C	70 °C	60 °C	
Takaisinmaksuaika	Ei TMA	Ei TMA	Ei TMA	a
Nettonykyarvo	-20 022 618	-20 596 283	-18 426 331	€
Turpeen määrä vakio				
Takaisinmaksuaika	Ei TMA	Ei TMA	Ei TMA	a
Nettonykyarvo	-18 738 875	-19 315 407	-17 376 628	€

Kaikki kuivurit tuottavat vuodessa tappiota. Kuten Andritzin tapauksessa, takaisinmaksuaikoja ei voida määrittää myöskään Metson kuivureille, joten investointi ei ole siltä osin kannattava. Myöskään nettonykyarvolla laskettaessa investoinnit eivät ole kannattavia. Nettonykyarvo on pienimmillään kuivauskaasun ollessa 60 °C:ta, turpeen määrän ollessa vakio. Syynä kuivurin kannattamattomuuteen voidaan pitää kaukolämmön menoveden korkeaa omakustannehintaa.

Taulukossa 6.8. on laskettu muutos kattilaprosessissa sekä savukaasuissa kuivaamattoman ja kuivatun polttoaineen välillä. Vertailu on tehty kahden laskentatavan välillä.

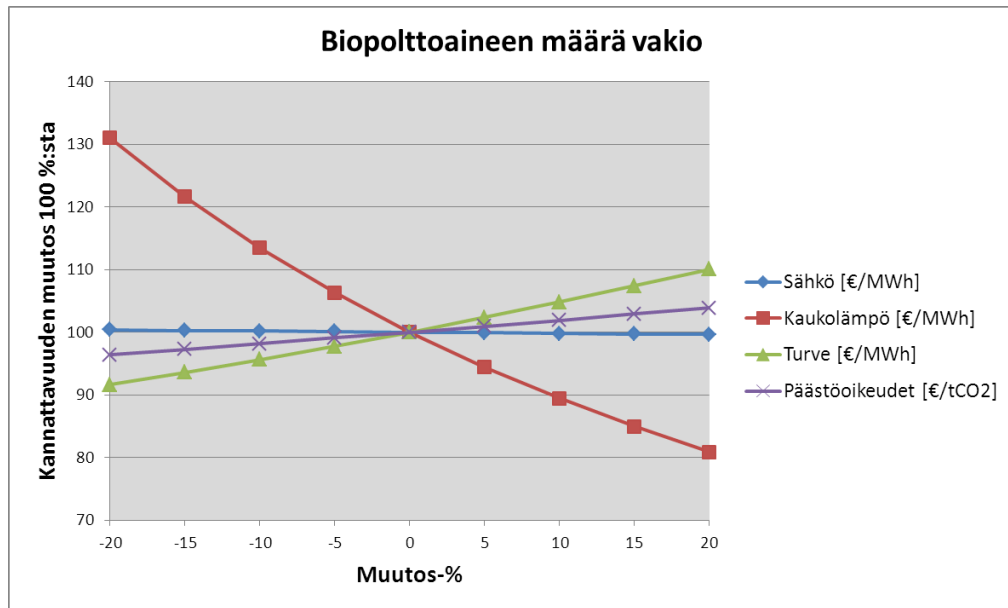
**Taulukko 6.8.** Muutos kattilaprosessissa sekä savukaasuissa Metson hihnakuivurilla.

	Biopolttoai- neen määrä vakio	Turpeen määrä vakio	
Kattilan hyötysuhde	0,56	0,49	%
Adiabaattinen palamislämpötila	176	167	°C
Happokastepiste	-1,4	-0,9	°C
Savukaasuvirta	-12,0	-11,5	%
Hiilidioksidivirta	-8,3	-8,1	%
Rikkidioksidivirta	-11,2	-5,4	%

Verrattaessa taulukon 6.8. arvoja taulukkoon 6.6. huomataan Andritzin kuivurin paremmat arvot sekä kattilaprosessissa että savukaasuissa. Erot johtuvat Andritzin kuivurin alhaisemmasta loppukosteudesta. Pidettäessä biopolttoaineen määrä vakiona, kattilan hyötysuhde kasvaa yli 0,5 %. Savukaasujen rikkidioksidille käy kuten taulukon 6.6. tapauksessa, sitä muodostuu enemmän turpeen määrän ollessa vakio. Tämä johtuu turpeen korkeasta rikkipitoisuudesta. Biopolttoainemäärän ollessa vakio kattilan adiabaattinen palamislämpötila kasvaa noin 176 °C ja happokastepiste laskee noin 1,4 °C verrattaessa kuivaamattomaan polttoaineeseen.

### *Herkkyysanalyysi*

Tarkastellaan herkkyysanalyysissä taulukon 6.7. parhaan nettonykyarvon omaavaa kuivuria (kuivauskaasu 60 °C). Käytetään samaa periaatetta kuin Andritzin hihnakuivurissa. Kuvassa 6.6. on tehty herkkyysanalyysi biopolttoaineen määrän ollessa vakio. Tällöin biopolttoaineen kustannuksista ei tule säästöjä/tappioita.



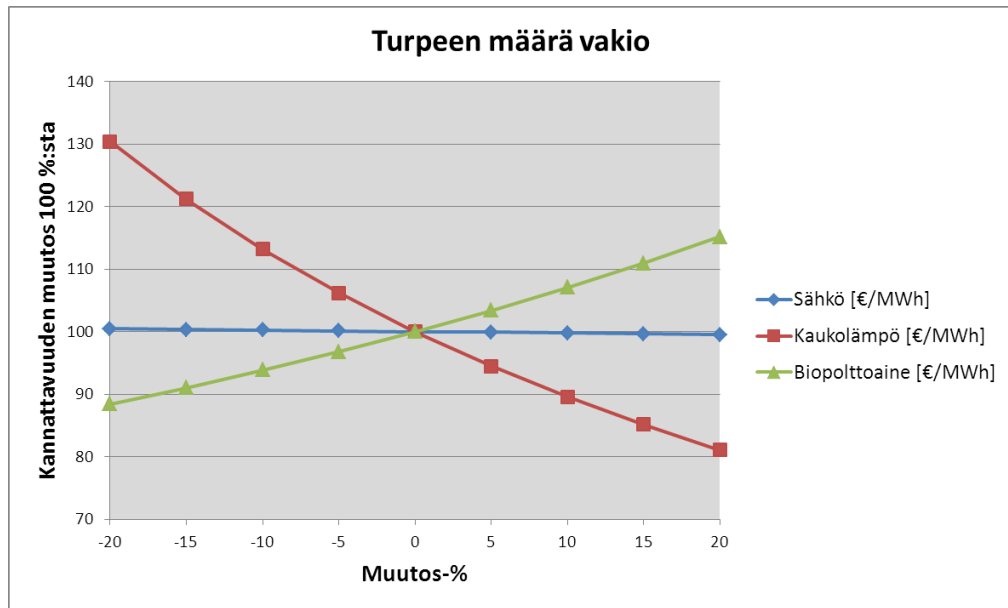
**Kuva 6.6.** Herkkyysanalyysi biopolttoaineen määrän ollessa vakio.

Kuvaaja on hyvin samanlainen kuin Andritzin tapauksessa. Sähkön hinnalla ei ole juuri vaikutusta kannattavuuteen. Kaukolämmön menovedellä on suurin vaikutus kannattavuuteen. Muutos ei ole niin suuri kuin Andritzin kuivurissa. Turpeella ja sen päästöoikeuksien kasvulla on positiivinen vaikutus kannattavuuteen.

Kaukolämmön hinnan pitäisi laskea vuodessa 29,1 %, jotta kumulatiivinen kannattavuus olisi nolla viimeisenä vuotena. Viimeisen vuoden hinnaksi muodostuisi 0,04 €. Vastaavasti turpeen hinnan muutos pitäisi olla 11,6 % vuodessa. Turpeen hinnaksi tulisi tällöin 86,0 €/MWh ja ensimmäinen kannattava vuosi olisi 12. toimintavuosi. Päästöoikeuksien pitäisi nousta 17,8 % vuodessa. Viimeisenä vuotena päästöoikeuksien hinnaksi tulisi 247,7 €/tCO<sub>2</sub> ja ensimmäinen kannattava vuosi olisi 13. toimintavuosi. Nämä prosentuaaliset muutokset ovat käytännössä mahdottomia.

Metson kuivureista 100 °C ja 70 °C lämmönlähteillä herkkyysanalyysin kuvaajissa kaukolämmöllä on hieman jyrkempi kulmakerroin. Turpeella ja päästöoikeuksilla kulmakerroin on vastaavasti hieman loivempi.

Kuvassa 6.7. on tehty tarkastelu herkkyysanalyysillä turpeen määrän ollessa vakio. Tällöin turpeen ja päästöoikeuksien kustannuksista ei tule säästöjä/tappioita.



**Kuva 6.7.** Herkkyysanalyysi turpeen määrän ollessa vakio.

Kuvaaja on samanlainen kuin Andritzin tapauksessa. Metson kuivurissa kaukolämmön sekä biopolttoaineen kulmakerroin on loivempi kuin Andritzilla. Kaukolämmön hinnan pitäisi olla 31,1 % vuodessa, jotta viimeisen vuoden kumulatiivinen kannattavuus olisi nolla. Kaukolämmön hinta olisi viimeisenä vuotena 0,02 €. Vastaava muutos biopolttoaineen hinnalla pitäisi olla 9,4 % vuodessa. Viimeisenä vuotena biopolttoaineen hinnaksi tulisi 88,0 €/MWh ja ensimmäinen liikevoitollinen vuosi olisi 12. toimintavuosi. Ottaen huomioon kummankin tapauksen prosentuaaliset muutokset, Metsonkaan hihnakuivurista ei saada kannattavaa. Seuraavassa kappaleessa on tarkoitus tarkastella, onko Rauhalahteen mahdollista saada kannattavaa kuivuria.

### 6.2.3 Kannattava hihnakuivuri

Tarkoituksena on tutkia muita lämmönlähteen vaihtoehtoja, joita toimittajat ehdottivat. Tavoitteena on minimoida omakustannehinnoiltaan kalliita lämmönlähteitä – kaukolämpö ja prosessihöyry. Tarkasteluun valitaan kuivuritekniikaltaan Metson toimittama hihnakuivuri. Tekniikan hyvänä puolena on mahdollisuus käyttää lämmönlähteenä ilmaista kaukolämmön paluuvettä. Andritzin hihnakuivurissa tämä ei ole mahdollista, koska kaikkien lämmönlähteiden on oltava kuumempia kuin vesiglykolipiirin loppulämpötila.

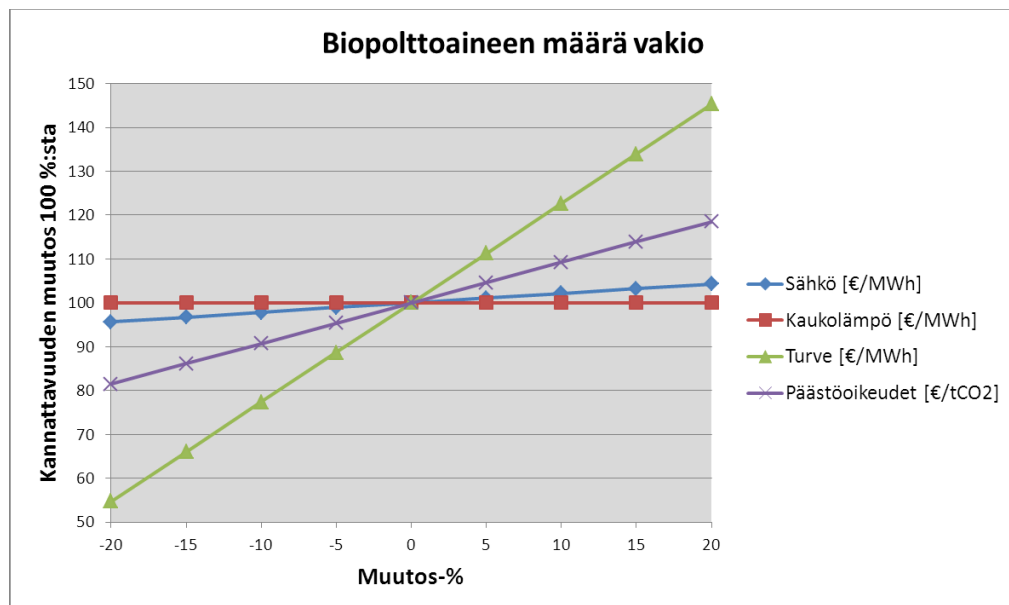
Metson kuivurissa vesiglykolipiiri lämmitetään edelleen kaukolämmön paluuvellä. Sen sijaan kuumavesipiiriin lisätään yksi lämmönvaihdin lisää, jotta saataisiin käytettyä mahdollisimman paljon halpaa lämmönlähdettä. Edeltävissä tarkasteluissa kuumavesipiiri toimi yhdellä lämmönvaihtimella. Tällöin savukaasun sekä lauhteen massavirta ei olisi ollut riittävä tuottamaan tarvittavaa lämpöenergiaa. Tarkastelun kiinteinä hintoina käytetään kappaleen 6.1.2 arvoja.

Tarkasteltaviksi kuivauskaasun lämpötiloiksi valitaan 70 °C ja 60 °C. Kuumimmalla kuivauskaasulla (100 °C) halvimpien lämmönlähteiden massavirrat kasvavat liian suuriksi, minkä seurauksena sitä ei ole otettu tarkasteluissa huomioon. Laskentamallissa käydään läpi kuumavesipiirin kaikki mahdolliset lämmitysvaihtoehdot, kun käytössä on kaksi lämmönvaihdinta. Lämmönlähteitä on käytettävissä neljä: kaukolämpö meno, lauhde, prosessihöyry sekä savukaasu. Eri lämmitysvariaatiota näistä kertyy 6 kappaletta. Liitteessä 8 on laskettu eri variaatioille takaisinmaksuaika sekä nettonykyarvo.

Kaukolämmön menoveden käyttäminen lämmönlähteenä todettiin epäedulliseksi aiemmissa tarkasteluissa. Toinen korkean omakustannehinnan omaava prosessihöyry näyttäisi olevan kannattava vain kuivauskaasun lämpötilan ollessa 70 °C ja biopolttoaineen määrän pysyessä vakiona. Prosessihöyryn laskuissa on otettu huomioon turbiinista saatava lisäteho 1,5 MW. Höyryn massavirrat ovat noin 3 kg/s. Arvioitu massavirta lisäteholle kappaleen 5.3 mukaan on 4-5 kg/s. Kun massavirtana käytetään esimerkiksi 4 kg/s, kuivurin kannattavuus heikkenee.

Ainoa kannattava vaihtoehto on käyttää kuumavesipiirin lämmitykseen lauhdetta sekä savukaasua. Pienin takaisinmaksuaika sekä suurin nettonykyarvo saadaan, kun käytetään kuivauskaasun lämpötilana 70 °C ja biopolttoaineen määrä pidetään vakiona. Takaisinmaksuajaksi muodostuu noin 8 vuotta ja nettonykyarvoksi 3724 k€. Takaisinmaksuaikana nettonykyarvossa on käytetty 19 vuotta. Investointi on kannattava vielä 10 vuoden takaisinmaksuajalla.

Kuvassa 6.8. on tehty herkkyyssanalyysi tuottoisimmalle kuivurille. Tällöin biopolttoaineen määrä on vakio, jolloin siitä ei tule kustannuksiin säästöjä/tappioita.



**Kuva 6.8.** Herkkyyssanalyysi biopolttoaineen määrän ollessa vakio

Herkkyyssanalyysitarkastelussa kaikki muuttuvat parametrit ovat kannattavia, jos muutos on positiivinen. Kaukolämpö ei vaikuta kannattavuuteen, koska sitä ei käytetä

lämmönlähteenä. Sähkön hinnalla on suurempi merkitys verrattaessa aiempiin tarkasteluihin. Myös turpeen ja päästöoikeuksien kulmakertoimet ovat jyrkemmät. Esimerkiksi 5 %:n hinnan nousu turpeessa kasvattaa kannattavuutta noin 10 %:a. Herkkyysanalyysistä saadaan viimeisen vuoden kumulatiiviseksi kannattavuudeksi 5855 k€, parametriarvolla nolla. Jos vuotuiseksi inflaatioksi laitetaan 1 %, sähkön hinnan nousulle 0,5 % ja päästöoikeuksille 0,25 %, kasvaa kumulatiivinen kannattavuus 7301 k€.

Lauhteen ja savukaasun käytössä massavirrat ovat suuret. Lauhteelle massavirta on 32 kg/s, joka on hieman korkeampi kuin arvioitu maksimimassavirta 30 kg/s. Savukaasun massavirta on lähes 1/3 kokonaismassavirrasta. Kaukolämmön massavirta on noin 340 kg/s ja lämmönvaihtimen teho 21,3 MW. Etenkin lauhteen ja savukaasun maksimimassavirrat pitäisi selvittää tarkemmin. Teknilliseltä osalta kuivuri olisi mahdollista rakentaa.

## 7 LASKENTAOHJELMA

Työssä syntynyt Excel-pohjainen laskentaohjelma kattaa neljä osaa: kuivurin mitoituksen, kattilaprosessin, energiantuotantoprosessin ja kannattavuuden. Kuivurin mitoituksessa saadaan laskettua massa- ja energiatase. Massa- ja energiataseella saadaan selvitettyä kuivauskaasun ja lämmönlähteiden ainevirrat, lämmönlähteiden tehontarve sekä poistettavan veden määrä. Kattilaprosessissa saadaan tarkasteltua kuivauksen vaikutusta savukaasuihin, kattilahyötysuhteeseen, adiabaattiseen palamislämpötilaan sekä happokastepisteeseen. Kattilaprosessissa tarkasteluja saadaan tehtyä kuivaamattoman ja kuivatun polttoaineen välillä. Energiantuotantoprosessissa nähdään eri lämmönlähteiden vaikutus prosessin. Kannattavuudessa saadaan selville kuivurin takaisinmaksuaika, nettonykyarvo sekä kuivurille voidaan tehdä herkkyyssanalyysitarkastelu.

Laskentamallissa lähtöarvot on muutettavissa ja ne ovat merkattu erikseen tumman-sinisillä soluilla. Lähtöarvoina on muun muassa: polttoaineteho, biopolttoaineen osuus polttoainetehosta, tavoitekosteus, lämmönlähteet sekä muuttuvien ja kiinteiden kustannusten hinnat. Käyttäjän on lisäksi mahdollista tehdä tarkastelu joko pitämällä biopolttoaineen määrä vakiona tai pitämällä turpeen määrä vakiona.

Ohjelman pohjana ovat Rauhalahteen toimitettujen polttoaineiden tiedot, joita on käsitelty kappaleessa 4.1. Näiden tietojen pohjalta määräytyvät saapumistilassa olevan polttoaineen kosteus sekä massavirrat.

Kaikissa laskennoissa on käytetty hyväksi Excelin omia funktioita. Joitain laskentoja joudutaan suorittamaan iteratiivisesti makrojen avulla. Iteratiivisiin laskentoihin on liitetty painike, jota painamalla makro suorittaa yhden laskentakierroksen. Painiketta pitää suorittaa niin monta kertaa, että erikseen merkatut massataseet ovat arvoltaan nollia. Kuivurin mitoituksessa ulostuleva kuivauskaasun lämpötila säätelee kuivurin hyötysuhdetta. Käyttäjän on itse säädettävä tämä lämpötila, joka määräytyy märkälämpötilan mukaan. Kuivurin hyötysuhteena voidaan pitää 80 %.

Laskentaohjelmasta löytyy kannattavuustarkastelut kappaleen 6 kuivureille. Lisäksi ohjelmassa on suora yksivaiheinen kuivuri kolmiportaisella lämmöntonnuilla. Sillä pystytään tekemään kannattavuustarkasteluja, joko yhdellä, kahdella tai kolmella eri lämmönlähteellä. Liitteenä 9 on kokonaiskuva yksivaiheisen kuivurin teknistaloudellisesta laskentapohjasta.

Ohjelma on energiantuotantoprosessin osalta tehty Rauhalahden voimalaitoksen mukaisesti, joten kuivurin teknistaloudellinen tarkastelu pystytään tekemään vain Rauhalahden voimalaitokselle. Mikäli ohjelmaa halutaan hyödyntää jossain toisessa laitoksessa, joudutaan muutokset tekemään energiantuotantoprosessiin.



## 8 YHTEENVETO

Biopolttoaineen suorassa termisessä kuivauksessa vesi haihdutetaan polttoaineesta. Poistunut vesi kasvattaa kostean polttoaineen tehollista lämpöarvoa. Kostean polttoaineen tehollisen lämpöarvon kasvaessa voidaan joko biopolttoaineen määrää vähentää tai fossiilisen polttoaineen osuutta pienentää seospoltossa. Kokonaisuudessaan pienempi polttoaineen massavirta vähentää savukaasun määrää, joka vaikuttaa suoraan ilmasto-päästöihin.

Rauhalahdessa kostean polttoaineen tehollisen lämpöarvon nousu pienentäisi savukaasuvirtaa keskimäärin 12 %. Kasvihuonepäästöiksi luokiteltavan hiilidioksidin ja ympäristölle haitallisen rikkidioksidin määrät vähenisivät noin 8 ja 12 %. Tämä auttaa hieman uuden EU-direktiivin päästövaatimusten täyttymisessä. Typen oksidipäästöjä työssä ei tarkasteltu. Voidaan olettaa, että nekin vähenevät savukaasuvirran pienentyessä. Toisaalta kuivauksen johdosta korkeampi adiabaattinen palamislämpötila voi muodostaa enemmän termistä typen oksidia.

Korkeampi adiabaattinen palamislämpötila voi johtaa kattilan leijupedin lämpötilan nousuun, jolloin joudutaan käyttämään enemmän kiertokaasua lämpötilan tasaamiseksi. Kiertokaasun käyttö voi heikentää sitä hyötyä, jonka korkeampi adiabaattinen palamislämpötila toisi, eli puhtaamman palamisen.

Biopolttoaineen alhaisempi vesipitoisuus parantaa kattilan hyötysuhdetta. Rauhalahdessa hyötysuhde paranisi noin 0,7 %. Korkeampi hyötysuhde pienentää savukaasuhäviöitä. Vesipitoisuus vaikuttaa myös happokastepisteeseen. Happokastepisteessä rikkihappo voi aiheuttaa korroosiota. Mitä alhaisemmaksi happokastepiste saadaan, sitä pienemmät ovat savukaasuhäviöt. Laskennallisesti happokastepiste laskee vain hieman, joten tästä ei ole käytännön hyötyä.

Työhön pyydettiin kartoitetuista kuivureista tarjouspyynnöt, joiden perusteella tehtiin kannattavuuslaskelmat. Kuivurikonsepteissa päädyttiin rumpu- sekä hihnakuivureihin. Toimittajat lähettivät omat ehdotuksensa tarjouspyynnön pohjalta. Toimittajien tarjouksista yksikään konsepti ei ollut kannattava. Rumpukuivureilla ongelmaksi muodostuivat suuret savukaasuvirrat. Lämmönlähteen rajoittuneisuus johti siihen, ettei rumpukuivureille saatu laskettua kokonaiskustannuksia laisinkaan. Hihnakuivureilla kannattavuus heikkeni huomattavasti, kun lämmönlähteenä käytettiin omakustannehinnaltaan kallista kaukolämmön menovettä. Laskelmissa kuivureille ei saatu takaisinmaksuaikaa ja nettonykyarvo jäi negatiiviseksi. Herkkyysanalyysitarkastelussa muuteltavien hinta-parametrien muutokset vuotta kohden muodostuivat käytännössä mahdottomiksi.

Yhdelle toimittajien hihnakuivureista tehtiin tarkasteluja eri lämmönlähde vaihtoehtoilla. Kuivurin kannattavuus riippuu suurelta osin käytettävien lämmönlähteiden kus-

tannuksista, ei niinkään investointikustannuksista. Alhaisilla lämmönlähteiden omakustannehinnoilla saatiin hankintakustannuksiltaan kalliskin kuivuri kannattavaksi käyttöajan puitteissa. Edullisilla lämmönlähteillä ongelmaksi muodostuvat alhaiset massavirrat. Tarkasteluissa kannattavin tulos saatiin käyttämällä halvimpia lämmönlähteitä sekä pitämällä biopolttoaineen määrä vakiona. Turpeen määrää vähentäessä saavutettiin myös paremmat teknilliset tulokset.

Kannattavan kuivurin liittäminen voimalaitosprosessiin on käytännössä mahdollista, mutta se vaatii lisätutkintaa. Etenkin halpojen lämmönlähteiden maksimimassavirrat pitäisi selvittää tarkemmin ja pyrkiä tutkimaan niiden vaikutus koko prosessiin. Kuivurin kokonaistehontarvetta kannattaisi laskea käyttämällä sitä ennen mahdollisimman edullisia menetelmiä. Esimerkiksi kesällä kannattaa hyödyntää kenttäkuivauksessa aurinkoenergiaa. Termisen kuivurin lisäksi voisi miettiä myös edullista mekaanista kuivuria, jolla saataisiin laskettua kosteusprosenttia esimerkiksi 30 %:iin. Tällöin termisessä kuivauksessa voitaisiin käyttää myös kalliimpia omakustannehinnan omaavia lämmönlähteitä. Ilmastopäästöjen tiukentuessa voimalaitokselle joudutaan todennäköisesti asentamaan savukaasupesuri. Tällöin olisi myös hyvä kartoittaa pesurista tulevien lauhdevesien kelpoisuus lämmönlähteenä. Tällaisten hukkaenergioiden hyödyntäminen vähentää häviöiden määrää voimalaitoksen kokonaisenergiataseessa. Häviöiden pieneneminen parantaa laitoksen kokonaishyötysuhdetta.

Kaikista edellä mainituista laskelmista tehtiin yksi laskentaohjelma. Ohjelmalla saadaan laskettua samanaikaisesti kuivurin massa- ja energiatase, vaikutus kattila- ja energiaprosessiin sekä kuivurin kannattavuus. Lähtöarvot on muutettavissa ja ne ovat merkattu erikseen. Ohjelmaa pystytään käyttämään kuivurin teknistaloudelliseen tarkasteluun Rauhalahden voimalaitoksessa. Laitoskohtaiset muutokset pitää tehdä erikseen laskentaohjelman energiaprosessiin, joka on mallinnettu tällä hetkellä Rauhalahden prosessin mukaisesti.

## LÄHTEET

Aittomäki, A. Teknillinen termodynamiikka, Prosessit ja energian muutokset. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. 104 s.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. 173 s. + liitt. 17 s.

Alakangas, E. & Holviala, N. 2003. Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. VTT-SYMP-231. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 430 s.

Alakangas, E. & Alanen, V-M. 2005. Lämmöntuotannon polttoaineet. Teoksessa: Kokkonen, A. & Lappalainen, I. Hakelämmöstä yritystoimintaa. Kuopio, Motiva. 26-31 s.

Amos, W.A. 1998. Report on Biomass Drying Technology. Colorado, National Renewable Energy Laboratory. 28 s.

Andritz, 2011. Biomass drying, Belt drying systems [WWW]. Graz [viitattu 7.10.2011]. Saatavissa:

<http://www.andritz.com/ANONID116BF97A1DE4299C/renewableenergy/renewableenergy-technologies-and-systems/renewableenergy-whywedrybiomass/biomass-belt-dryer/once-through-type.htm>

Biopolttoaineet, 2010. Bioenergiatietoa, Biopolttoaineet [WWW]. FINBIO ry. 22.4.2010, [viitattu 7.7.2011]. Saatavissa:

<http://www.suomenbioenergia.net/default.asp?SivuID=9166>

Boles, M.A. & Cengel, Y.A. 2007. Thermodynamics: An Engineering Approach. Sixth edition (SI units). New York, McGraw-Hill. 922 s. + liitt. 49 s.

Cooper, J.R. 2008. Dew Point for Flue Gas of Power-Plant Exhaust. [pdf-tiedosto]. The International Association for the Properties of Water and Steam. [viitattu 10.8.2011]. Saatavissa:

<http://www.iapws.org/icrn/ICRN23.pdf>

Granö, U-P. 2007. Bioenergiaa Metsästä 2003-2007. [pdf-tiedosto]. Jyväskylän yliopisto, Chydenius-instituutti, Kokkolan yliopistokeskus. Euroopan Unionin Interreg-projekti. Projekti-info 110. [viitattu 29.6.2011]. Saatavissa:

[https://ciweb.chydenius.fi/project\\_files/FI-INFO-pdf-b/INFO-F110.pdf](https://ciweb.chydenius.fi/project_files/FI-INFO-pdf-b/INFO-F110.pdf)

Halkonen, T. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Helsinki, Kauppa- ja teollisuusministeriö. 63 s. + litt. 10 s.

Havu, A. 2011. Toimitusjohtaja, Biomassat, Metso Paper Oy. Pori. Sähköposti 15.9.2011.

Holmberg, H., Ahtila, P., Arhippainen, P. & Spets J-P. 2000. Sekundäärilämpöjen hyödyntäminen metsäteollisuuden käyttämien kiinteiden biopolttoaineiden kuivauksessa. Espoo, Teknillinen korkeakoulu. 92 s. + liitt. 12 s.

Holmberg, H. 2007. Biofuel Drying as a Concept to Improve the Energy Efficiency of an industrial CHP Plant. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, ISBN 978-951-22-8648-5. 63 s. + julkaisut 62 s.

Holmberg, H. 2011. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa. Espoo. Tekninen korkeakoulu. 240 s. + liitt. 13 s.

Huhtinen, M. Kettunen, A. Nurminen, P. & Pakkanen, H. 1994. Höyrykattilatekniikka. Helsinki, Opetushallitus. 304 s. + liitt. 10 s.

Hukka, A. 1996. Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT julkaisuja 815. 50 s. + liitt. 1 s.

Hämäläinen, K. 2011. Hakkeen Kuivauksen Teoreettinen ja Kokeellinen Tarkastelu. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma. 62 s. + liitt. 3 s.

Iisa, K. Yrjas, P. & Kilpinen, P. 2002. Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. Poltto ja Palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 343-370 s.

Ilmansuojelu. 2008. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. 71 s.

Karema, H. 2002. Liitteet. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. Poltto ja Palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 679-750 s.

Kares, M. & Linna, V. 1983. Polttoaineen puhallin kuivatus pientaloissa ja maatiloilla. Helsinki, Kauppa- ja Teollisuusministeriö, Tutkimusraportti nro 25 B. 81 s.

Karvinen, R. Termodynamiikan Perusteet. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. 53 s. + liitt. 9 s.

Lampinen, M.J., Kotiaho, W. & Leskelä, M. 1998. Huokoisen Materiaalin Kuivauksen Termodynaamiset Perusteet. Espoo, Teknillinen korkeakoulu. 38 s. + liitt. 4s.

Lampinen, M.J. & Seppälä, A. 2008. Kostean Ilman Termodynamiikka, Tilapiirrookset ja Reaalikaasut. Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu. 82 s.

Linna, V. & Järvinen, T. 1983. Hakkeen keinokuivauksen tekniset ratkaisut ja taloudellisuus. Helsinki, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Tutkimusraportti nro 25 A. 114 s. + liitt. 6 s.

Metso, 2010. Wood handling, Bark and biomass handling and storage [WWW]. 3.5.2010, [viitattu 7.10.2011]. Saatavissa: <http://www.metso.com/pulpandpaper/MPwFiber.nsf/WebWID/WTB-101112-2256F-2DF3B?OpenDocument>

Mitchell Dryers, 2011. Mitchell Dryers Ltd, Rotary dryers [WWW]. Cumbria. [viitattu 7.10.2011]. Saatavissa: <http://www.mitchell-dryers.co.uk/rotary.shtml>

Nord Pool Spot, 2011. Nord Pool Spot, Elspot prices [WWW]. 29.9.2011. [viitattu 30.9.2011]. Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/#>

Norrkniivilä, M. 2011. Biopolttoaineen Kuivauslaitteisto. Opinnäytetyö. Oulu. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. 42 s. + liitt. 3 s.

Pitkänen, A. 2010. ENER-6010 Polttotekniikan Harjoitukset. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 84 s.

Polttoaineluokitus. 2005. Tilastokeskus, Kasvihuonekaasuinventaario [WWW]. 11.2.2005. [viitattu 16.11.2011]. Saatavissa: <http://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/polttoaineluokitus.html>

Puuenergia. 2003. Jyväskylä, Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. 115 s.

Puupolttoaineiden laatuohje, 1998. Bioenergiatietoa, Puuperäiset polttoaineet, Puupolttoaineiden laatuohje [WWW]. FINBIO ry. 10.11.2002, [viitattu 4.7.2011]. Saatavissa: <http://www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=9287>

Päästötietojen tuottamismenetelmät, Energiantuotanto. 2005. Ympäristöhallinto. 85 s. + liitt. 19 s.

Raiko, R. 2002. Palamisen termodynaamiset perusteet. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. Poltto ja Palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 31-59 s.

Raiko, R. 2010. ENER-8100, Energiatalous. Tampere. 210 s.

Rantonen, A. 2011. Vastaa Suomen Servicen toiminnoista, MW Power Service. Puhelinkeskustelu 25.10.2011.

Roos, C.J. 2008. Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power. Olympia, Northwest CHP Application Center. 25 s. + liitt. 4 s.

Ryymin, R. 2011. Kehityspäällikkö, Jyväskylän Energia Oy. Jyväskylä. Haastattelu 1-4.11.2011.

Saarno, T. 2011. Käyttöpäällikkö, Jyväskylän Energia Oy. Jyväskylä. Sähköposti 8.9-3.10.2011.

Salonen, M. 2011. Tuotantoinisinööri, Jyväskylän Energia Oy. Jyväskylä. Sähköposti 30.9.2011.

Sääasema Jyväskylä, Nenäinniemi, 2010 [WWW]. Jyväskylä. [viitattu 12.7.2011]. Saatavissa: <http://jyv-weather.info/index.php>

Tapanainen, J. 1982. Turpeen ja biomassan kuivaus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 107. 40 s.

Vandenbroek, 2009. Vandenbroek International, Drum dryers [WWW]. Barneveld. [viitattu 7.10.2011]. Saatavissa: <http://www.vadeb.com/products/drum-dryers/>

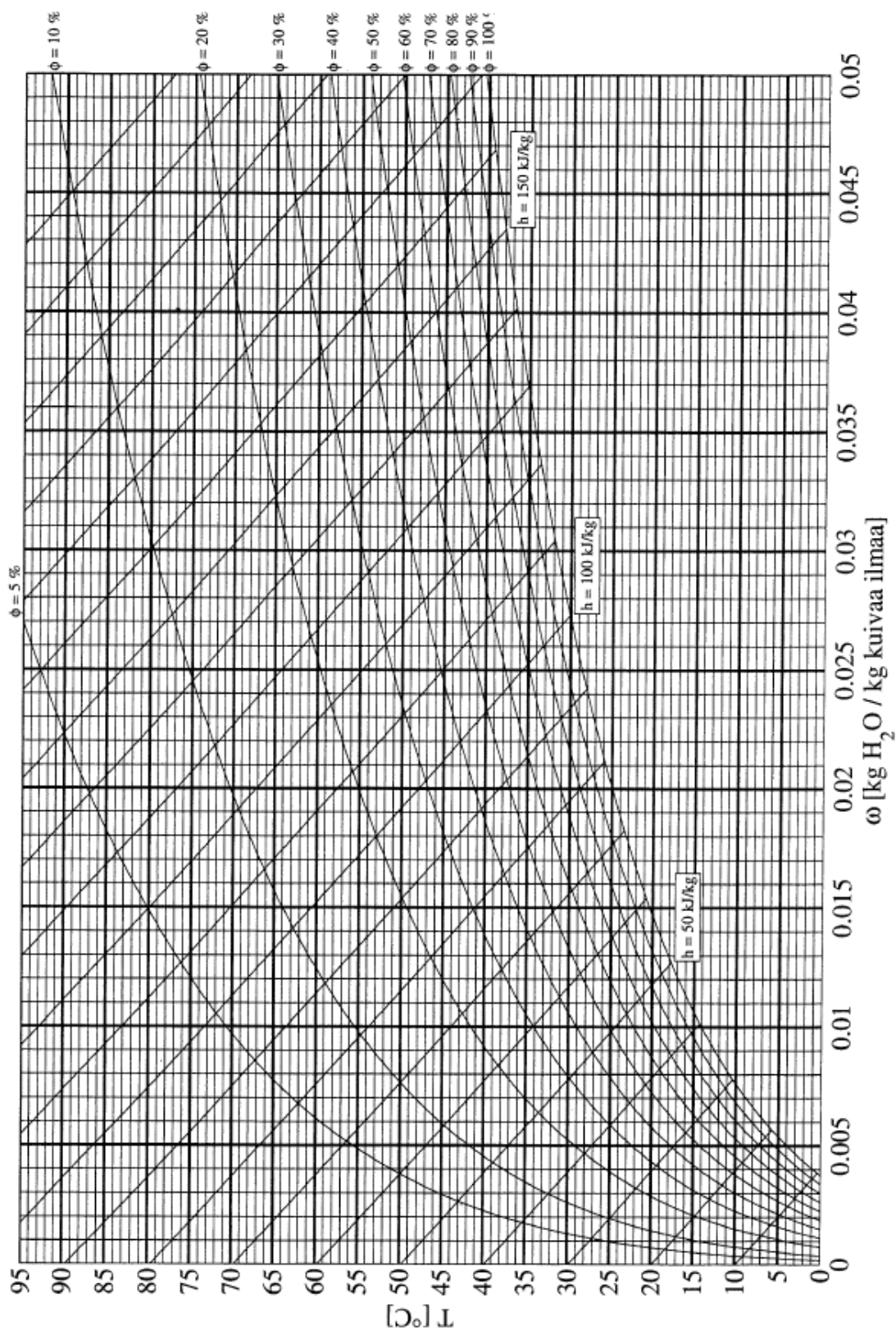
Wahlroos, L. 1981. Aurinkoenergia. Pori, Satakunnan kirjateollisuus.

Worley, M. 2011. Biomass Drying Technology Update [pdf-tiedosto]. Harris Group Inc. BioPro Expo & Marketplace, Atlanta, GA., [viitattu 29.6.2011]. Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/Events/11BIOPRO/19.2Worley.pdf>

## LIITE 1: ERI PUUPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIEN VERTAILU

[illegible]

## LIITE 2: KOSTEAN ILMAN (H, $\Omega$ ) -PIIRROS



$$p_{\text{tot}} = 101300 \text{ Pa}$$



### LIITE 3: BIOPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA KUUKAUSITTAIN VUOSINA 2005-2010

Teollisuuden sivutuotteet, hake					Teollisuuden sivutuotteet, murska			
	Kosteus- prosentti	Saapumis- tilassa olevan pa:n tehollinen lämpöarvo	Kuiva- aineen tehollinen lämpöarvo	Kostean pa:n tehollinen lämpöarvo tavoitekosteus- dessa 25 %	Koste- uspro- sentti	Saapumis- tilassa olevan pa:n tehollinen lämpöarvo	Kuiva- aineen tehollinen lämpöarvo	Kostean pa:n tehollinen lämpöarvo tavoitekos- teudessa 25 %
	%	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	%	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Tammi	50,92	8,10	19,04	13,67	60,97	5,96	19,07	13,69
Helmi	50,91	8,11	19,06	13,68	59,08	6,37	19,09	13,71
Maalis	51,13	8,06	19,05	13,68	59,31	6,32	19,08	13,70
Huhti	48,24	8,68	19,05	13,68	60,39	6,08	19,07	13,69
Touko	44,14	9,57	19,06	13,68	51,14	8,06	19,05	13,68
Kesä	41,97	9,47	18,08	12,95	51,78	7,93	19,07	13,69
Heinä	42,43	9,94	19,07	13,69	43,81	9,66	19,10	13,71
Elo	42,61	9,91	19,08	13,70	51,62	7,97	19,09	13,70
Syys	44,99	9,40	19,08	13,70	52,98	7,68	19,09	13,71
Loka	44,64	9,46	19,06	13,68	58,08	6,59	19,10	13,71
Marras	48,01	8,73	19,04	13,67	58,19	6,56	19,08	13,70
Joulu	46,69	9,01	19,04	13,67	62,03	5,73	19,09	13,71
<b>Keskiarvo</b>	<b>47,18</b>	<b>8,89</b>	<b>19,02</b>	<b>13,65</b>	<b>57,26</b>	<b>6,76</b>	<b>19,08</b>	<b>13,70</b>
Metsäpolttoaineet, hake					Metsäpolttoaineet, murska			
Tammi	46,90	9,17	19,43	13,96	50,73	8,42	19,60	14,09
Helmi	46,54	9,23	19,38	13,93	50,61	8,38	19,46	13,99
Maalis	46,28	9,41	19,62	14,10	49,77	8,50	19,35	13,90
Huhti	45,32	9,45	19,31	13,87	51,61	8,12	19,38	13,92
Touko	42,74	10,05	19,38	13,92	44,32	9,77	19,50	14,01
Kesä	42,32	10,19	19,46	13,99	45,68	9,51	19,56	14,06
Heinä	39,78	10,77	19,50	14,02	40,53	10,63	19,55	14,05
Elo	38,89	10,97	19,50	14,01	39,35	10,90	19,56	14,06
Syys	40,45	10,62	19,50	14,01	42,74	10,14	19,54	14,04
Loka	40,05	10,69	19,47	13,99	44,35	9,77	19,50	14,02
Marras	44,15	9,78	19,45	13,97	49,52	8,63	19,48	14,00
Joulu	43,72	9,81	19,32	13,88	48,26	8,87	19,42	13,96
<b>Keskiarvo</b>	<b>43,89</b>	<b>9,84</b>	<b>19,44</b>	<b>13,97</b>	<b>47,42</b>	<b>9,09</b>	<b>19,48</b>	<b>14,00</b>
Kannot, hake & murska					Rankapuu, hake ja murska			
Tammi	32,40	12,02	18,95	13,60	42,00	10,05	19,10	13,72
Helmi	31,88	12,22	19,08	13,70	41,47	10,17	19,10	13,72
Maalis	35,00	11,54	19,07	13,69	48,10	8,81	19,24	13,82
Huhti	35,02	11,54	19,08	13,70	40,40	10,40	19,10	13,72
Touko	34,03	11,79	19,12	13,73	49,82	8,38	19,12	13,73
Kesä								
Heinä								
Elo								
Syys								
Loka	29,46	12,69	19,01	13,65	35,44	11,47	19,10	13,71
Marras	34,06	11,74	19,07	13,69	34,89	11,58	19,10	13,71
Joulu	31,98	12,13	18,99	13,63	41,34	10,19	19,10	13,72
<b>Keskiarvo</b>	<b>33,62</b>	<b>11,83</b>	<b>19,05</b>	<b>13,68</b>	<b>42,01</b>	<b>10,06</b>	<b>19,11</b>	<b>13,72</b>

## LIITE 4: MASSA- JA ENERGIATASEEN LASKENTA MONIVAIHEISELLE KUIVAUKSELLE

Veden sidontamäärä ilmassa			
Ilma sisään			
Ulkoilman lämpötila	t	-6,00	°C
Ulkoilman suhteellinen kosteus	$\varphi$	85,00	%
Polttoaineen lämpötila	$T_{pa}$	-4,0	°C
Veden höyrynpaine	$p_{h'}$	387	Pa
Vesihöyryn osapaine	$p_h$	329	Pa
Ilman kosteus	$\omega$	0,0020	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Entalpia sisään	$h_k$	-1,01	kJ/kg
1. lämmitys/kuivaus			
Kaukolämpö paluu	$t_s$	50	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus ulos	$t_{a_u}$	5	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus sisään	$t_{a_s}$	26	°C
Entalpia ulos	$h_k$	50,59	kJ/kg
Entalpian muutos	$\Delta h_k$	51,60	kJ/kg
Märkälämpötila	$t_{wb}$	17,6	°C
Ilman kosteus märkälämpötilassa	$\omega$	0,0130	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Kuivauskaasun kosteus lopussa	$\omega$	0,0076	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
2. lämmitys/kuivaus			
Kaukolämpö paluu	$t_s$	50	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus ulos	$t_{a_u}$	5	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus sisään	$t_{a_s}$	5,4	°C
Entalpia ulos	$h_k$	64,88	kJ/kg
Entalpian muutos	$\Delta h_k$	25,92	kJ/kg
Märkälämpötila	$t_{wb}$	22,0	°C
Ilman kosteus märkälämpötilassa	$\omega$	0,0168	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Kuivauskaasun kosteus lopussa	$\omega$	0,0149	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
3. lämmitys/kuivaus			
Kaukolämpö paluu	$t_s$	50	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus ulos	$t_{a_u}$	5	°C
Lämmönvaihtimen asteisuus sisään	$t_{a_s}$	3,5	°C
Entalpia ulos	$h_k$	83,90	kJ/kg
Entalpian muutos	$\Delta h_k$	19,11	kJ/kg
Märkälämpötila	$t_{wb}$	26,9	°C
Ilman kosteus märkälämpötilassa	$\omega$	0,0223	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Kuivauskaasun kosteus lopussa	$\omega$	0,0208	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ki</sub>
Irtokuutiosta poistettava vesimäärä			
Alussa			
Polttoaineen kosteus-%	$w_s$	46,67	%
Kosteussuhde	$u_s$	87,53	%
Lopussa			
Polttoaineen kosteus-%	$w_u$	25,00	%
Kosteussuhde	$u_u$	33,33	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ka</sub>
Poistettava vesimäärä			
Veden massavirta	$m_v$	2,86	kg/s
Kosteussuhde	$\Delta u$	54,19	%

Kuivaus osuus			
1. k	33.3	%	
2. k	33.3	%	
3. k	33.3	%	

Kuivauskaasu			
$t_s$	-6.0 °C		
$\omega_s$	0.0020 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	172.2 kg/s		
$V_{ki}$	130.4 m <sup>3</sup> /s		
$Q_{s3}$	-174 kW		

Tehot	
$Q_{lv}$	15404 kW

Lämmönlähde			
$t_s$	50.0 °C		
$m_{s3}$	70.9 kg/s		
$Q_{s3}$	14833 kW		

1. Lämmönvaihdin			
$Q_{lv}$	8887 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	20.0 °C		
$m_{s3}$	70.9 kg/s		
$Q_{s3}$	5946 kW		

Kuivauskaasu			
$t_s$	45.0 °C		
$\omega_s$	0.0020 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	172.2 kg/s		
$V_{ki}$	155.3 m <sup>3</sup> /s		
$Q$	8713 kW		

Polttoaine			
$T_{p1}$	-4.0 °C		
$u_{p1}$	87.53 %		
$m_{p3}$	5.27 kg/s		
$Q_{p3}$	-1604 kW		

1. Kuivain			
$\eta$	0.66		

Kuivauskaasu			
$t_{i1}$	19.6 °C		
$\omega_{i1}$	0.0076 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	172.2 kg/s		
$V_{ki}$	142.9 m <sup>3</sup> /s		
$Q_{s3}$	6710 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	50.0 °C		
$m_{s3}$	32.1 kg/s		
$Q_{s3}$	6730 kW		

2. Lämmönvaihdin			
$Q_{lv}$	3354 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	50.0 °C		
$m_{s3}$	32.1 kg/s		
$Q_{s3}$	6730 kW		

Kuivauskaasu			
$t_s$	45.0 °C		
$\omega_s$	0.0076 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	129.4 kg/s		
$V_{ki}$	116.7 m <sup>3</sup> /s		
$Q$	8396 kW		

Polttoaine			
$T_{p1}$	17.6 °C		
$u_{p1}$	69.46 %		
$m_{p3}$	5.27 kg/s		
$Q_{p3}$	399 kW		

2. Kuivain			
$\eta$	0.80		

Kuivauskaasu			
$t_{i2}$	26.0 °C		
$\omega_{i2}$	0.0149 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	129.4 kg/s		
$V_{ki}$	109.7 m <sup>3</sup> /s		
$Q_{s3}$	8316 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	50.0 °C		
$m_{s3}$	32.1 kg/s		
$Q_{s3}$	6730 kW		

2. Lämmönvaihdin			
$Q_{lv}$	3354 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	25.0 °C		
$m_{s3}$	32.1 kg/s		
$Q_{s3}$	3375 kW		

Kuivauskaasu			
$t_s$	45.0 °C		
$\omega_s$	0.0076 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	129.4 kg/s		
$V_{ki}$	116.7 m <sup>3</sup> /s		
$Q$	8396 kW		

Polttoaine			
$T_{p1}$	25.7 °C		
$u_{p1}$	51.40 %		
$m_{p3}$	5.27 kg/s		
$Q_{p3}$	479 kW		

3. Kuivain			
$\eta$	0.80		

Kuivauskaasu			
$t_{i3}$	30.9 °C		
$\omega_{i3}$	0.0208 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	161.1 kg/s		
$V_{ki}$	138.8 m <sup>3</sup> /s		
$Q_{s3}$	13600 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	50.0 °C		
$m_{s3}$	37.0 kg/s		
$Q_{s3}$	7743 kW		

3. Lämmönvaihdin			
$Q_{lv}$	3162 kW		

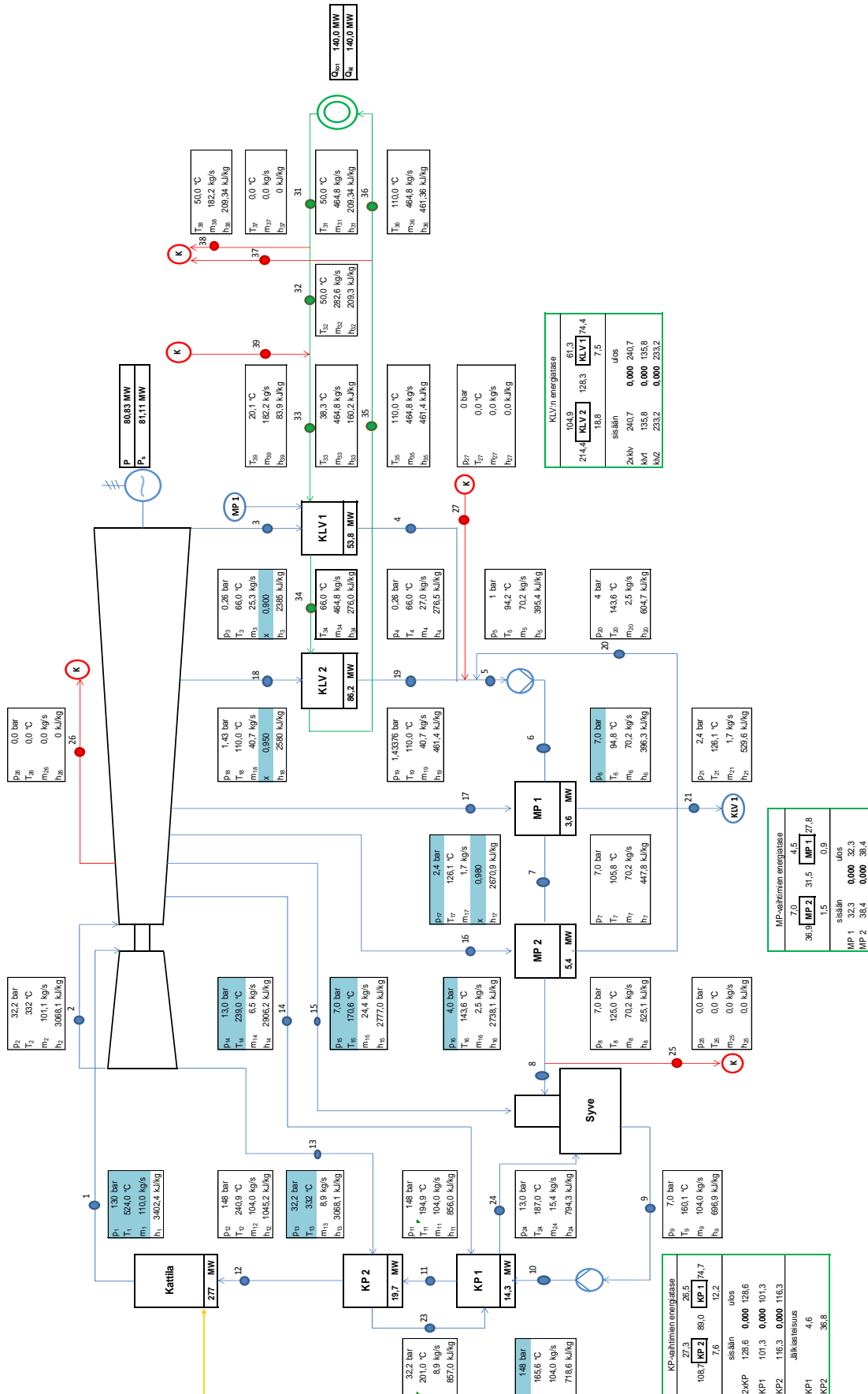
Kuivauskaasu			
$t_s$	45.0 °C		
$\omega_s$	0.0149 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	161.1 kg/s		
$V_{ki}$	145.2 m <sup>3</sup> /s		
$Q$	13515 kW		

Polttoaine			
$T_{p1}$	26.9 °C		
$u_{p1}$	33.33 %		
$m_{p3}$	5.27 kg/s		
$Q_{p3}$	394 kW		

Kuivauskaasu			
$t_s$	26.0 °C		
$\omega_s$	0.0149 kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>ku</sub>		
$m_{ki}$	161.1 kg/s		
$V_{ki}$	136.6 m <sup>3</sup> /s		
$Q_{s3}$	10353 kW		

Lämmönlähde			
$t_s$	29.5 °C		
$m_{s3}$	37.0 kg/s		
$Q_{s3}$	4581 kW		

# LIITE 5: ENERGIANTUOTANTOPROSESSI



## LIITE 6: TARJOUSPYYNTÖ



7.9.2011

1 (1)

We would like to have an offer for belt dryer.

Dryer would be part of CHP plant and the drying material is mix of different biofuels (see specifications). The plant is part of Jyväskylä Energy LTD and it's located in Jyväskylä, Finland.

### Specifications

Inlet moisture:	~ 50 %
Residual moisture:	25-20 %
Biofuel dry mass flow:	~ 8,8 kg/s
Materials:	Wood chips Wood residues Sawdust Bark
Possible heat sources:	Long district heat water inlet ~ 50 °C Long district heat water outlet 80-110 °C (summer-winter) Feed water ~ 125 °C Flue gas ~ 230 °C Steam ~ 170 °C and ~ 7 bar
Other notes:	Biofuel might be frozen in the winter time.

The offer should be detailed so that pricing for different main components are shown. Also the requirements for heat and electricity consumptions and maintenance costs per tons of drying material should be shown.

Offer should be submitted by email at the latest 23.9.2011.

For more information please contact:

Mr. Jussi Alpua  
Power Plant Engineer  
Jyväskylä Energy LTD  
Mobile: +358 44 366 4081  
[jussi.alpua@jenergia.fi](mailto:jussi.alpua@jenergia.fi)

## LIITE 7: HERKKYYSANALYYSI

Parametrit		Kuvun käyttöaika																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Muutos	Vuodet	Käyttöaika h/a	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
		Inflaatio %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
	19	Sähkö €/MWh	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98	68,98
		Kaukolämpö €/MWh	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90	21,90
	19	Biopolttoaine €/MWh	17,50	17,68	17,85	18,03	18,21	18,39	18,58	18,76	18,95	19,14	19,33	19,53	19,72	19,92	20,12	20,32	20,52	20,73
Tuote €/MWh			12,00	12,12	12,24	12,36	12,48	12,61	12,74	12,87	12,99	13,12	13,26	13,39	13,52	13,66	13,79	13,93	14,07	14,21
0,00 %		13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	

Tuloslaskelma		Kuvun käyttöaika																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tulot yhteensä		€	1 304 011	1 312 062	1 320 193	1 328 406	1 336 701	1 345 079	1 353 541	1 362 087	1 370 719	1 379 437	1 388 243	1 406 118	1 415 190	1 424 553	1 433 608	1 442 055	1 452 395	1 461 508
Sähkön lisätuotto		€	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241	66 241
Säästetty biopolttoaine		€	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Säästetty tuote		€	805 106	813 157	821 288	829 501	837 796	846 174	854 636	863 182	871 814	880 532	889 338	907 213	916 286	925 448	934 703	944 050	953 490	963 025
Säästetyt CO <sub>2</sub> päästökorvaukset		€	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194	329 194
Puhallimissa säästetty sähkö		€	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470	103 470
Kulut yhteensä		€	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222	2 328 222
Menetetty kaukolämpö		€	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139	1 905 139
Kuvun sähkötoho		€	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695	189 695
Kuvaustoho		€	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387	173 387
Kuvunssapito		€	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
Käte		€	-1 024 211	-1 016 160	-1 008 029	-999 816	-991 521	-983 143	-974 681	-966 135	-957 503	-948 785	-939 979	-931 086	-922 104	-913 031	-903 669	-894 614	-885 267	-876 292
Poistot		€	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146	-338 146
Liikevoitto (tappio)		€	-1 362 357	-1 354 306	-1 346 174	-1 337 961	-1 329 666	-1 321 288	-1 312 827	-1 304 280	-1 295 648	-1 286 930	-1 278 125	-1 269 232	-1 260 249	-1 251 177	-1 242 014	-1 232 760	-1 223 413	-1 213 972
Kumulatiivinen liikevoitto		€	-1 362 357	-2 716 663	-4 062 837	-5 400 798	-6 730 465	-8 051 753	-9 364 580	-10 668 860	-11 964 509	-13 251 439	-14 529 584	-15 798 796	-17 059 045	-18 310 222	-19 552 236	-20 764 996	-22 008 408	-23 222 381
																				-24 426 819

Laitoksen käyttöaika	5000 h/a
Korkokanta	5,00 %
Takaisinmaksuaika	19a

## LIITE 8: LÄMMÖNLÄHTEIDEN VERTAILU

Kuivauskaasu 70 °C				
Biopolttoaineen määrä vakio				
<i>Lämmönlähteet</i>	KL-meno & lauhde	KL-meno & prosessihöyry	KL-meno & savukaasu	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>62,8</b>	<b>Ei TMA</b>	<b>640,1</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-5 352 201</b>	<b>-7 997 797</b>	<b>-6 501 887</b>	<b>€</b>
<i>Lämmönlähteet</i>	Lauhde & prosessihöyry	Lauhde & savukaasu	Savukaasu & prosessihöyry	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>11,2</b>	<b>7,7</b>	<b>13,4</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>517 780</b>	<b>3 724 358</b>	<b>-666 963</b>	<b>€</b>
Turpeen määrä vakio				
<i>Lämmönlähteet</i>	KL-meno & lauhde	KL-meno & prosessihöyry	KL-meno & savukaasu	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>55,7</b>	<b>Ei TMA</b>	<b>112,8</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-5 190 303</b>	<b>-7 229 803</b>	<b>-5 916 706</b>	<b>€</b>
<i>Lämmönlähteet</i>	Lauhde & prosessihöyry	Lauhde & savukaasu	Savukaasu & prosessihöyry	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>12,3</b>	<b>8,2</b>	<b>12,2</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-116 737</b>	<b>3 198 779</b>	<b>-61 138</b>	<b>€</b>
Kuivauskaasu 60 °C				
Biopolttoaineen määrä vakio				
<i>Lämmönlähteet</i>	KL-meno & lauhde	KL-meno & prosessihöyry	KL-meno & savukaasu	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>66,3</b>	<b>Ei TMA</b>	<b>359,5</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-6 236 989</b>	<b>-8 944 453</b>	<b>-7 370 600</b>	<b>€</b>
<i>Lämmönlähteet</i>	Lauhde & prosessihöyry	Lauhde & savukaasu	Savukaasu & prosessihöyry	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>12,9</b>	<b>8,8</b>	<b>15,4</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-462 214</b>	<b>2 807 977</b>	<b>-1 653 307</b>	<b>€</b>
Turpeen määrä vakio				
<i>Lämmönlähteet</i>	KL-meno & lauhde	KL-meno & prosessihöyry	KL-meno & savukaasu	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>59,9</b>	<b>Ei TMA</b>	<b>111,5</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-6 087 662</b>	<b>-8 165 807</b>	<b>-6 800 657</b>	<b>€</b>
<i>Lämmönlähteet</i>	Lauhde & prosessihöyry	Lauhde & savukaasu	Savukaasu & prosessihöyry	
<b>Takaisinmaksuaika</b>	<b>13,2</b>	<b>9,3</b>	<b>14,0</b>	<b>a</b>
<b>Nettonykyarvo</b>	<b>-618 010</b>	<b>2 332 816</b>	<b>-1 048 445</b>	<b>€</b>

# LIITE 9: LASKENTAOHJELMA

